

Niederdruckstrahlwäsche von Gemüse

Zusammenhänge zwischen Strahlparametern
und Abtrags- bzw. Reinigungswirkung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. **Ermyas Mulugeta**
geb. am 12. September 1968 in **Addis Abeba / Äthiopien**

genehmigt durch das **Institut für Umweltingenieurwesen**
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock

Rostock, den 04. Mai 2010

Tag der Einreichung: **4. Juni 2010**

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Eckstädt

Institut für Umweltingenieurwesen der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät,
Universität Rostock

Dr. agr. Martin Geyer

Abteilung Technik im Gartenbau, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V.
(ATB)

Prof. Dr. Siegfried Kleisinger

Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim

Tag der Verteidigung: **10. Dezember 2010**

- **Meinen Kinder gewidmet** -

Vorwort

Gemüse wird in sauberem, möglichst attraktivem Zustand verkauft und wird dazu vor der Vermarktung gereinigt bzw. gewaschen. Hierzu werden unterschiedliche Waschverfahren eingesetzt, wobei neben Trommel- und Flotationswaschmaschinen, Düsenwaschmaschinen die größte Bedeutung haben. Bei Düsenwaschmaschinen werden Niederdruckwasserstrahldüsen eingesetzt, um das Gemüse schnell, schonend und hygienisch zu reinigen. Ein großes Problem dieses Verfahrens ist der hohe Wasser- und Energieverbrauch. Insbesondere bei der Feldwäsche ist die begrenzte Wasserverfügbarkeit eine große Herausforderung.

Das Waschen von Gemüse mit Niederdruckwasserstrahlen ist bei oberflächlicher Betrachtung ein einfaches und wenig kompliziertes Reinigungsverfahren. Erst bei intensiver Beschäftigung mit diesem Vorgang wird deutlich, dass eine Vielzahl von sich gegenseitig beeinflussenden bzw. von einander abhängigen Parametern den Reinigungsprozess bestimmen.

Das Reinigen von Oberflächen mit Niederdruckwasserstrahlen, insbesondere von gegen mechanische Belastungen empfindlichem Gemüse, wurde wissenschaftlich bisher wenig bearbeitet. Diese Fragestellung hat Dr. Ermyas Mulugeta im Rahmen des BMBF Forschungsprojektes „Optimierung des Waschprozesses für Gemüse und Speisekartoffeln“ am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) aufgegriffen und die grundlegenden hydrodynamischen Zusammenhänge zwischen Düsen- und Betriebsparametern und den Strukturen der Strahlen ermittelt. Darauf aufbauend hat er ein standardisiertes Testverfahren zur Charakterisierung der abtragsrelevanten Strahlausbildung entwickelt und, auf der Basis von Beschädigungsgrenzen für die Wasserstrahlbelastung verschiedener Gemüsearten, einen Bewertungsschlüssel zur gezielten Düsenauswahl entwickelt. Abschließend macht Mulugeta Vorschläge zur Optimierung der Düsenkonfiguration bezüglich des Zerfallsverhaltens der Wasserstrahlen und deren Wirkungsgrade für verschiedene Waschverfahren.

Es kann erwartet werden, dass die Ergebnisse in die technische Entwicklung von Reinigungsdüsen wie auch in die Gestaltung von Gemüsewaschmaschinen einfließen werden. Außerdem gibt die Arbeit viele Hinweise für den effizienten Einsatz von Gemüsewaschmaschinen in der Praxis.

Potsdam, den 15.12.2010



Dr. Martin Geyer
Abteilungsleiter Technik im Gartenbau

Danksagung

Gewidmet ist diese Arbeit meinen drei Kindern, welche mein Leben besonders lebenswert gestalten und es mit Freude und Stolz erfüllen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im ATB bei der Bearbeitung des BMBF-Projektes „Optimierung des Waschprozesses für Gemüse und Speisekartoffeln“.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Eckstädt für seine aufrichtige Art und ehrlichen ermutigenden Worte herzlich bedanken, welcher mich durch seine Bereitschaft auf den Weg der Verwirklichung des Vorhabens brachte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. agr. Martin Geyer für die konstruktiv-kritischen Gespräche, fachlich-thematischen Diskussionen, Ausdauer, Zeit und freundliche Unterstützung und dass er mir auch in schweren persönlichen Zeiten mit Worten und Taten zur Seite stand. Er hat durch seine aufschlussreiche, kritische und motivierende Art maßgeblichen Anteil an der Entstehung und Vollendung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Kleisinger danke ich für die Übernahme des Gutachtens, wodurch auch er zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Diese Danksagung gilt auch weiteren Personen, u. a. Herr Ingo Truppel und Mathias Täge, welche mich wesentlich und intensiv unterstützt haben.

Insbesondere möchte ich meiner Lebensbegleiterin Daniela Rex aufrecht und herzlich für ihre wahre Hilfsbereitschaft, tatkräftige Motivation, alltägliche Unterstützung und menschliche Stärkung bedanken.

Ganz besonderen Dank gebührt meiner Familie, welche den Grundstein für diesen Weg und für meine Lebenseinstellung legte. Ich danke meiner Mutter, meinem verstorbenen Vater und meinen fünf Schwestern.

Ermyas Mulugeta

Borkheide, 04. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemdarstellung.	1
2. Zielstellung und Aufgaben.	2
3. Stand der Forschung und der Technik.	3
3.1 Definition des Strahlreinigens	4
3.2 Grundlegende Betrachtungen bisheriger Erkenntnisse aus Strahlstudien . . .	5
3.2.1 Strahlzerfall	
3.2.2 Aufbau und Eigenschaften des Reinigungsstrahls	
3.2.3 Vorgänge beim Strahlaufprall und bei Belastungen der Materialien	
3.2.4 Wirkmechanismen und Materialverhalten bei Strahldruckbelastung	
3.3 Anwendungsorientierte Untersuchungen und Forschungsschwerpunkte . . .	16
3.4 Relevante Prozessparameter beim Strahlreinigen.	18
3.5 Anforderung an den Wasserstrahl für die Gemüsewäsche	21
4. Material und Methode	25
4.1 Strahlreinigen von Gemüse mittels Niederdruckdüsen.	25
4.1.1 Art und Ausführung der Düsenwaschmaschinen	
4.1.2 Komponente der Reinigungsanlage	
4.2 Versuchsmaterial und –aufbau im Labor.	29
4.2.1 Versuchsparameter unter Laborbedingungen	
4.2.2 Versuchsdurchführung	
4.2.2.1 Bestimmungen der funktionellen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern	
4.2.2.2 teilflächenbezogene Betrachtung von Messdaten der Strahlparameter	
4.2.2.3 Aufbereitung und statistische Auswertung der Strahlstrukturdaten	
4.2.2.4 Abschätzung des Schädigungspotentials der Strahlen am Gemüse	
4.3 Ermittlung der Reinigungseffektivität in Praxisanlagen.	47
4.4 Verknüpfung der Untersuchungsergebnisse	48

5. Ergebnisse und Diskussion	49
5.1 Funktionelle Zusammenhänge der Parameter im Abtragsprozess.	49
5.1.1 Strahleigenschaften bei variierenden Inputparametern	
5.1.1.1 Düsendurchmesser	
5.1.1.2 Betriebsparameter	
5.1.2 Untersuchung zum Materialabtrag durch Wasserstrahlen	
5.1.2.1 Energetische Betrachtung der Strahlen	
5.1.2.2 Wirkungs- und Abtragsanalyse	
5.1.2.3 Regressionsanalyse der ermittelten Strahldaten	
5.1.3 Strahleffizienzanalyse bei der Materialabtragung	
5.2 Strahlanwendung für die Gemüsewäsche	67
5.2.1 Teilflächendifferenzierte Betrachtung der Abtragseffektivität und Strahleffizienz	
5.2.1.1 Flachstrahldüsen, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$	
5.2.1.2 Flachstrahldüsen, $\theta_{s,h=0} = 60^\circ$	
5.2.1.3 Vollkegeldüsen	
5.2.1.4 Regressionsanalyse der erzielten Strahldaten	
5.2.2 Abschätzung des Schädigungspotentials der Wasserstrahlen bei Gemüsewäsche	
5.2.3 Analyse der Reinigungseffektivität von Wasserstrahlen bei der Gemüsewäsche	
5.3 Kombination der für die Gemüsewäsche relevanten Einflussparameter . .	103
5.4 Bewertungsschlüssel für Waschdüsen und Strahlvarianten für produktbezogene Einsatzgebiete	105
5.5 Hinweise zur Optimierung der Düsenkonfiguration und zur konstruktiven Umsetzung	107
6. Zusammenfassung	109
7. Literaturverzeichnis	115
8. Anhang	123

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a		Steigung der Ausgleichsgerade
A_a	$[\text{cm}^2]$	Abtragsfläche
$A_{ae,h=f(z)}$	$[\text{cm}^2]$	effektive Abtragsfläche
A_p	$[\text{mm}^2]$	Produktoberfläche
A_P	$[\text{cm}^2]$	Strahldruckfläche
$A_{s,h=f(z)}$	$[\text{cm}^2]$	Strahlfläche in Abhängigkeit des Arbeitsabstands
$b_{s,1}$	$[\text{mm}]$	Spritzbreite in x-Achse
$b_{s,2}$	$[\text{mm}]$	Spritztiefe in y-Achse
$b_{s,max}$	$[\text{mm}]$	maximaler Abtragbreite des Strahls
$C_{s,sp}$	$[\text{mg mm}^{-2} \text{s}^{-1}]$	spezifische Massenstromdichte der wirksamen Strahlsegmente bzw. Tropfen
D		Tropfenanzahldichte
d_{32}	$[\mu\text{m}]$	Sauter-Durchmesser der Tropfen
d_d	$[\text{mm}]$	Düsendurchmesser
d_t	$[\mu\text{m}]$	Tropfendurchmesser
E	$[\text{mg cm}^{-2} \text{h}^{-1}]$	Transpirationsrate
E_c	$[\mu\text{m}]$	Transpirationskoeffizient
$E_{s,ve}$	$[\text{g mm}^{-2} \text{s}^{-1}]$	Abtragseffizienz des Wasserstrahls
e		Eulersche Zahl
$e_{s,h=0}$	$[\text{Nm}]$	Strahlenergie bzw. -leistung am Strahlaustritt
F_r	$[\text{N}]$	aerodynamische Reibungskraft
F_σ	$[\text{N}]$	Kohäsionskraft
h_a	$[\text{cm}]$	Arbeitsabstand vom Strahlaustritt
$h_{a,k}$	$[\text{cm}]$	kritischer Arbeitsabstand vom Strahlaustritt
$h_{s,kern}$	$[\text{cm}]$	Abstand des Strahlkerns
$h_{s,kompakt}$	$[\text{cm}]$	Abstand des Kompaktstrahls
h_s	$[\text{cm}]$	Strahllänge vom Düsenausgang
$h_{s,z}$	$[\text{cm}]$	Länge des Strahlzefalls vom Strahlaustritt
$I_{s,sp}$	$[\text{g m s}^{-1}]$	spezifische Impulsintensität der wirksamen Strahlsegmente bzw. Tropfen
I_t	$[\text{g m s}^{-1}]$	spezifisches Impulspotential einzelner Tropfengrößenklasse
k		Konstante

l_d	[mm]	Düsenlänge
m_t	[mg]	Tropfenmasse
P	[bar]	Spritzdruck
P_D	[bar]	Poission-Verteilung
p_{max}	[kPa]	maximaler Strahldruck
$p_{stoß}$	[MPa]	Stoßdruck
p_{stau}	[MPa]	Staudruck
p_{wh}	[MPa]	Wasserhammerdruck
Q	[l min ⁻¹]	Durchfluss- bzw. Volumenstromrate
oh		Ohnesorgezahl
r_s	[mm]	Radius zur Strahlachse
r_{st}	[mm]	Radius des Tropfenstrahls
R		Regressionskoeffizient
Re		Reynoldszahl
r_B	[s cm ⁻¹]	Grenzschichtwiderstand
r_T	[s cm ⁻¹]	Gewebewiderstand
S	[kPa]	Materialfestigkeit
t	[s]	Zeit
t_a	[mm]	Abtragstiefe
t_{ae}	[mm]	effektive Abtragstiefe
t_b	[s]	Belastungsdauer des Strahls
t_v	[s]	Verweilzeit der Gemüse im Waschbereich
v_r	[m s ⁻¹]	Relativgeschwindigkeit des Strahls
$v_{s,Achse}$	[m s ⁻¹]	Strahlgeschwindigkeit an der Strahlachse
v_s	[m s ⁻¹]	Strahlgeschwindigkeit
$V_{s,sp}$	[mm ³ mm ⁻² s ⁻¹]	spezifische Volumenstromdichte des Strahls
v_t	[m s ⁻¹]	Tropfengeschwindigkeit
X_L	[mg]	Wassergehalt der Umgebungsluft
X_P	[mg]	Wassergehalt innerhalb des Produktes
X_{PS}	[mg]	Wassergehalt an der Produktoberfläche
We		Weberzahl
We_k		kritische Weberzahl

$\theta_{d,h=0}$	[Grad]	Düsen- bzw. Strahlwinkel unmittelbar beim Strahlaustritt
$\theta_{s,h=f(z)}$	[Grad]	Strahlwinkel in Abhängigkeit des Arbeitsabstands
λ		Belastungskoeffizient
μ		Widerstandsbeiwert für Druckdüsen
ρ_F	[kg m ⁻³]	Dichte des Wassers
ρ_L	[kg m ⁻³]	Dichte der Luft
σ_F	[N m ⁻²]	Oberflächenspannung des Wasserstrahls
α_s		Durchflussziffer des Strahls
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematische Viskosität des Wasserstrahls
ξ_a		Flächenratio zur Beschreibung der Abtrags-effektivität von Strahlen [$\xi_a = A_a / A_s$]
ξ_{ae}		Flächenratio zur Beschreibung der Abtrags-effektivität von Strahlen [$\xi_{ae} = A_{ae} / A_s$]
ξ_P		Flächenratio zur Beschreibung der Abtrags-potentiale von Strahlen [$\xi_P = A_P / A_s$]
ψ_P		Wasserpotential im Produkt
Ω		Häufigkeit

Indices

Bedeutung

<i>Achse</i>	Strahlachse
<i>ae</i>	effektiver Abtrag bzw. effektive Abtragsfläche
<i>h=0</i>	unmittelbar am Düsenausgang
<i>h=10; h=20</i>	in Arbeitsabstand von 10 cm bzw. 20 cm
<i>h=f(z)</i>	in Abhängigkeit des Arbeitsabstands in z-Achse
[K]	für den Strahlkern
<i>kern</i>	Strahlkern
<i>kompakt</i>	Kompaktstrahl
[M]	für die Strahlmitte
<i>max</i>	maximal
<i>n</i>	Anzahl der Tropfengrößenklassen
[R]	für den Strahlrand
<i>sp</i>	spezifisch
<i>st</i>	Tropfenstrahl
<i>Ve</i>	effektives Abtragsvolumen

Abkürzungen	Erklärung
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim
DIN	Deutsches Institut für Normung
E1 bis E7	in der Arbeit untersuchte Spritzdüsen
E1_13	Strahlvariante über die Strahlfläche A_s durch Anwendung der Düse E1 unter $p = 3\text{bar}$ in $h_a = 10\text{ cm}$
E1K13	Strahlvariante im Strahlkern [K] durch Anwendung der Düse E1 unter $p = 3\text{bar}$ in $h_a = 10\text{ cm}$
PDPA	Phasen-Doppler-Partikel- Analysator
SD	Standardabweichung
TF	Strahlteilfläche

Abbildungsverzeichnis

Abschnitt 3: Stand der Forschung und der Technik

Bild 3.1	<i>Systematischer Überblick von Reinigungsverfahren nach DIN 8580, DIN 8592 und DIN 8200</i>	4
Bild 3.2	<i>Grenzbereiche der verschiedenen Strahlzerfallsbereiche unter atmosphärischen Bedingungen nach v. Ohnesorge (1936)</i>	6
Bild 3.3	<i>Schematische Darstellung der Strahlstruktur, verändert nach Yanaida & Ohashi (1978)</i>	10
Bild 3.4	<i>Druck-Zeit-Verlauf bei unterschiedlichen Strahlzusammensetzungen nach Kroos (1995)</i>	13
Bild 3.5	<i>Zusammenstellung der relevanten Prozessparameter auf die Reinigungsergebnisse von Strahlen, verändert nach Brandt et al. (2001)</i>	19
Bild 3.6	<i>Einflussfaktoren auf den Reinigungsprozess von Gemüse, nach Mulugeta und Geyer (2003)</i>	22

Abschnitt 4: Material und Methode

Bild 4.1	<i>Düsenwaschmaschinen für Bleichspargel von Fa. HEPRO (Versuchsanlage) . .</i>	26
Bild 4.2	<i>Rotorwäscher u. a. für Sellerie und Porree (Fa. Hornung)</i>	26
Bild 4.3	<i>Feldverpackung von Kopfsalat mit Hilfe des mobilen Düsenwäschers (Fa. Hagenlocher)</i>	27
Bild 4.4	<i>Prototyp des mobilen Düsenwäschers von Fa. Hagenlocher (Versuchsanlage)</i>	27
Bild 4.5	<i>Versuchsstand zur Wasserstrahluntersuchung</i>	29
Bild 4.6	<i>Konventionelle Messmethode der Strahlverteilung (Foto: Lechler GmbH) . . .</i>	31
Bild 4.7	<i>Schematische Darstellung des Messaufbaus des angewendeten Messsystems, Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDPA)</i>	33
Bild 4.8	<i>(a) Anordnung des Foliendruckensors zur Bestimmung der Aufprallkräfte der Strahlen sowie (b) statistische Stabilität der Messergebnisse des Maximalaufpralldruckes $p_{\max, h=10}$ der Strahldruckflächen A_P in Abhängigkeit der Belastungsdauer t_b</i>	35
Bild 4.9	<i>(a) Beanspruchung des Testkörpers ($30 \times 10 \times 2$ cm) durch Wasserstrahl sowie (b) statistische Stabilität der Messergebnisse der mittleren Abtragstiefe t_a der Abtragsflächen A_a bei verschiedenen Messreihen und 2 Spritzdrücken ($h_a = 10$ cm; Düse E1)</i>	39
Bild 4.10	<i>Schema zur Bildung der Strahlteilflächen für Flachstrahldüsen in Abhängigkeit von Strahlradius r_s und Strahlwinkel θ_s bei zwei Arbeitsabständen h_a von 10 und 20 cm</i>	41
Bild 4.11	<i>Qualitative Darstellung der Strahlverteilung über die Strahlfläche A_s</i>	42

Bild 4.12	<i>Programm zur Definition von Schwellen für die Flüssigkeitsverteilung und zur Definition von Masken (Strahlteilfläche) zur Auswertung weiterer Messdaten .</i>	42
Bild 4.13	<i>Relevante Größen zur Bestimmung des Transpirationsverhaltens</i>	45
Bild 4.14	<i>Schematischer Aufbau einer Druckbombe nach Scholander</i>	46
Bild 4.15	<i>Die verwendete Apparatur zur Mikrotopographiemessung</i>	47

Abschnitt 5: Ergebnisse und Diskussion

Bild 5.1	<i>Verteilung der mittleren $V_{s,sp}$ als Funktion des p für Strahlen in 10 cm Strahllänge h_s für E1 und E4</i>	50
Bild 5.2	<i>Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ der Tropfenspektren der Wasserstrahlen bei Verwendung von E1 und E4 unter Variation des Druckes p und der Strahllänge h_s</i>	52
Bild 5.3	<i>Darstellung des mittleren I_t über die mittleren Größenverteilungen der Tropfenstrahlen in Abhängigkeit von h_s und p unter Anwendung von E1 und E4 . . .</i>	55
Bild 5.4	<i>Veränderung der mittleren $I_{s,sp}$ der Wasserstrahlen bei E1 und E4 unter Variation des p und h_s (vgl. Anhang B, Tabelle B1, B2 und B3)</i>	56
Bild 5.5	<i>Verteilungen der P_{max} bzw. der gemessenen pixelflächenbezogenen F_{max} der Wasserstrahlen bei $p = 3$ bar und $h_a = 10$ cm für E1 (unten) und für E4 (oben)</i>	57
Bild 5.6	<i>Verteilungen der t_a durch Wasserstrahlen bei $p = 3$ bar und $h_a = 10$ cm für E1 (unten, E1_13) und E4 (oben, E4_13)</i>	59
Bild 5.7	<i>Veränderungen der mittleren A_a in Abhängigkeit der variierenden Inputparameter, p und h_a</i>	59
Bild 5.8	<i>Veränderungen der Flächenratio ξ_a in Abhängigkeit der variierenden Inputparameter, p und h_a</i>	60
Bild 5.9	<i>Veränderung der mittleren Abtragtiefe t_a der Strahlen mit E1 und E4 in Abhängigkeit der variierenden Betriebsparameter p und h_a</i>	60
Bild 5.10	<i>effektive Abtragstiefe t_{ae} durch Wasserstrahlen bei Düsen E1 (E1_13) und E4 (E4_13) bei denselben Spritzbedingungen wie in Bild 5.6</i>	65
Bild 5.11	<i>Veränderungen der teilflächenbezogenen ($[K]$, $[M]$, $[R]$) Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ bei Vergrößerung des $d_d = 0,75$ (E1) bis $1,7$ mm (E4) bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruckanstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b)</i>	69
Bild 5.12	<i>Gegenüberstellung der teilflächenbezogenen ($[K]$, $[M]$, $[R]$) Mittelwerte der ξ_{ae} und der $E_{s,ve}$ bei Vergrößerung des $d_d = 0,75$ (E1) bis $1,7$ mm (E4) bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruckanstieg von 3 auf 8 bar für E1 und E4 (b)</i>	70

Bild 5.13	Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ bei Vergrößerung des h_a von 10 auf 20 mm und $d_d = 0,75$ bis 1,7 mm bei $p = 5$ bar (a) und bei Druckanstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b) . . .	72
Bild 5.14	Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der ξ_{ae} und der $E_{s,ve}$ bei Vergrößerung des d_d von 0,75 bis 1,7 mm bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruckanstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b)	73
Bild 5.15	Abhängigkeit der teilflächenbezogenen Verteilungsdichte $q_3(d_i)$ der Strahlen in h_a von 10 und 20 cm bei $p = 5$ bar von Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$ und d_d (E3, E4 und E5)	76
Bild 5.16	Verteilungen der t_a durch Strahlen bei $h_a = 10$ cm und $p = 5$ bar für E5 ($\theta_{s,h=0} = 60^\circ$) und E4 ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) sowie Gegenüberstellung der A_s , teilflächenbezogenen Strahlvolumenanteile, $\theta_{s,ae}$, und A_{ae} für Strahlvarianten mit den Düsen unten gleichen Spritzbedingungen	77
Bild 5.17	Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der Flächenratio ξ_{ae} und der Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ der Strahlen mit E5, bei $p = 5$ bar und in h_a von 10 und 20 cm	78
Bild 5.18	Gegenüberstellung der teilflächenbezogenen Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ in $h_a = 10$ und 20 cm für die Düsen E3 (Flachstrahl) und E7 (Vollkegel) bei $p = 5$ bar	79
Bild 5.19	Vergleich von Verteilungen der Abtragtiefe t_a auf standardisierte Testkörper durch Strahlbeanspruchungen mit E8 (oben) und E2 (unten) bei $p = 5$ bar und $h_a = 10$ cm	80
Bild 5.20	Zusammenhänge zwischen t_a über $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen in Abhängigkeit der untersuchten Düsen- (d_d) und Betriebsparameter (p und h_a)	82
Bild 5.21	(a) Beispiel eines Kopfsalates mit Druckstellen nach Aufprall des Strahls E4_23 und (b) relativer Anteil der Beschädigungen, eingeteilt in Strahlwirkungsklassen	85
Bild 5.22	Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Kopfsalat mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern bezogen Variation des Düsendurchmessers d_d , Druckes p und Arbeitsabstands h_a . . .	85
Bild 5.23	Sichtbare Beschädigungen des Oberflächengewebes bei Bleichspargeln durch Druckbelastung verschiedener Strahlvarianten	86
Bild 5.24	Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Bleichspargel mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern bezogen auf $I_{s,sp}$, t_a und t_v	87
Bild 5.25	Atmungs- und Transpirationsraten der Spargel vor und nach Belastung durch Strahlvariante E3_13 nach 96-minütiger bzw. 29,3-stündiger Lagerung bei ca. 25°C und 50 bis 60% relativer Feuchte sowie Angabe zu den Spektren der erfassten Transpirationsraten E und deren $\pm SD$ der Mittelwerte	90

Bild 5.26	<i>Mittlere Abnahme von r_T und Zunahme von E von unbelasteten und hydro-mechanisch belasteten Möhren zu unterschiedlichen Versuchszeiten (a) nach einstündiger Lagerung und (b) nach 24-stündiger Lagerung in Abhängigkeit von $I_{s,sp}$ bzw. Zusammenstellung der erzielten Messwertspektren und Angaben zu den $\pm SD$ der Mittelwerte</i>	91
Bild 5.27	<i>Mittlere Zunahme von E von unbelasteten und hydromechanisch belasteten Möhren nach ein-, zwei- bzw. 24-stündiger Lagerung und Angaben zu den $\pm SD$ der Mittelwerte sowie Zusammenstellung des im Rahmen der Versuche erfassten Messwertspektrums</i>	92
Bild 5.28	<i>Wasserpotential unbelasteter und hydromechanisch belasteter Möhren nach unterschiedlicher Lagerdauer (Lagerung bei 18°C bei einer Luftfeuchte von 45%) sowie Zusammenstellung des im Rahmen der Versuche erfassten Messwertspektrums</i>	94
Bild 5.29	<i>Exemplarisches Foto einer durch E4K15 beanspruchten Möhre nach eintägiger Lagerdauer mit Oberflächenverfärbung</i>	95
Bild 5.30	<i>Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Möhren mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern bezogen auf $I_{s,sp}$, t_a und t_v</i>	95
Bild 5.31	<i>Ausgewählte Höhenprofilardarstellung der Oberflächenausschnitte vor (—) und nach (----) der Spargelbeanspruchung durch die Strahlvarianten E3_13, E4_13, E3_13 und E4_15</i>	96
Bild 5.32	<i>Exemplarische Fotos der Reinigungsergebnisse von durch ähnliche Strahlvariante beanspruchte Gemüse unterschiedlicher Reinigungsklassen, für (a) Kopfsalat und (b) Spargel, und Kennwerte der Düsen-, Betriebsparameter der Waschmaschinen sowie Strahlstrukturdaten aus Laboruntersuchungen . .</i>	99
Bild 5.33	<i>Fotos der Waschbereiche von zwei verwendeten Versuchswaschanlagen während der Reinigungsversuche bei Möhren (siehe Bild 4.4 (a und b) und Bild 4.1 (c))</i>	101
Bild 5.34	<i>Exemplarische Fotos der Reinigungsergebnisse der Reinigungswirkungsklasse 2 durch Wasserstrahlvariante mit E4_23 Belasteten Möhren nach unterschiedenen Waschdurchgängen: 1- und 2mal</i>	102
Bild 5.35	<i>Klassifizierung und Zuordnung der abtrags- und reinigungsrelevanten Strahlparameter (Impulsintensität $I_{s,sp}$) in Bezug auf die Abtrags- (Abtragstiefe t_a) und produktspezifischen Beschädigungspotentiale bzw. die Reinigungseffektivität der Strahlen an zu reinigenden Frischgemüsen</i>	104

Abschnitt 6: Zusammenfassung

Bild 6.1	<i>Schema der Gesamtversuchsstrategie</i>	111
-----------------	---	-----

Tabellenverzeichnis

Abschnitt 3: Stand der Forschung und der Technik

Tabelle 3.1	<i>Überblick wirksamer Abtragsmechanismen beim Strahlreinigen</i>	16
--------------------	---	----

Abschnitt 4: Material und Methode

Tabelle 4.1	<i>Kennwerte der Versuchsdüsen (Düsendurchmesser d_d, Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$, Volumenstromrate Q und Spritzdruck p)</i>	30
Tabelle 4.2	<i>Versuchsbedingungen (u. a. Arbeitsabstand h_a)</i>	30
Tabelle 4.3	<i>Versuchsreihen zur Ermittlung der Reinigungs- und Schädigungspotentiale von Strahlen am Frischgemüse (Kopfsalat, Spargel und Möhren)</i>	43

Abschnitt 5: Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5.1	<i>Veränderungen der Strahlgeometrie und der mittleren $C_{s,sp}$ in Abhängigkeit der variierbaren Inputparameter, h_a und p</i>	50
Tabelle 5.2	<i>Veränderungen der mittleren d_{32} und v_t der Tropfengrößenverteilungen bei E1 und E4 unter variierenden Inputparametern, p und h_s.</i>	52
Tabelle 5.3	<i>Veränderungen in der Aufprallwirkung der Wasserstrahlen mit E1 und E4 unter Variation bestimmter Inputparameter, p und h_a.</i>	57
Tabelle 5.4	<i>Lineare Anpassungsfunktionen zwischen der t_a und $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen verschiedener Strahlvarianten</i>	63
Tabelle 5.5	<i>Vergleich der Abtragseffektivität und Effizienz der Strahlen unter veränderten Spritzbedingungen, effektiver Strahlwinkel $\theta_{s,ae}$ von der Strahlachse, effektive Abtragsfläche A_{ae}, Flächenratio ξ_{ae} und Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ (vgl. Bild 5.7 bis 5.9)</i>	65
Tabelle 5.6	<i>Arbeitsabstand- und teilflächenbezogene Korrelationen zwischen den erzielten Strahlparametern; Abtragstiefe t_a und Impulsintensität $I_{s,sp}$, sowie die gefundenen sowie die gefundenen Regressionskoeffizienten $R_{(I_{s,sp},t_a)}$ und Steigungen a der Ausgleichgeraden.</i>	81
Tabelle 5.7	<i>Mittlere Masseverluste von unbelasteten und durch verschiedene Strahlvarianten belastete Bleichspargel nach Lagerung bei ca. 25°C und 50 bis 60% relativer Feuchte sowie Angabe zu den Spektren der erfassten Massenverluste und deren $\pm SD$ der Mittelwerte</i>	88
Tabelle 5.8	<i>Bewertungsschlüssel von Düsen und Wasserstrahlvarianten Kennwerte zur Auswahl geeigneter Waschdüsen unter Angaben der aufgabenorientierten Betriebsparameter unter praxisbezogenen Spritzbedingungen im Hinblick auf eine effektive, effiziente und produktschonende Gemüseschwämme</i>	106

1. Einleitung und Problemstellung

Im Jahr 2008 wurden in der Bundesrepublik Deutschland 3,4 Mio. Tonnen Gemüse auf einer Anbaufläche von ca. 118.000 ha für den Verkauf erzeugt (EU 2008: 32,6 Mio. Tonnen). Ein großer Teil davon wurde vor der Vermarktung in den Gemüsebaubetrieben gewaschen und aufbereitet. Zur Reinigung von Gemüse u. a. Kopfsalat, Spargel, Porree, Bundmöhren, Radieschen und Sellerie werden, je nach dessen Art und Empfindlichkeit, überwiegend stationäre sowie mobile Waschmaschinen mit unterschiedlichen Reinigungsverfahren eingesetzt (Geyer 1999). Die Wäsche als wesentlicher Teil der Gemüseaufbereitung soll gründlich, produkt-schonend, wasser- und energiesparend und möglichst kostengünstig sein.

Für das Reinigen von Gemüse, insbesondere für den Rohverzehr und bei der Nachwäsche, muss gemäß der Lebensmittelhygieneverordnung (1998) Frischwasser mit Trinkwasserqualität im Sinne des § 7 Abs. 1 der Trinkwasserverordnung eingesetzt werden.

Das Frischwasser ist eine kostbare Ressource, die weltweit zunehmend knapper wird. Die Probleme variieren jedoch regional. Obwohl Wasser die am häufigsten vorkommende Substanz auf der Erdoberfläche ist, sind von dem vorhandenen Volumen nur 2,53 Prozent Süßwasser, das zudem sehr ungleich verteilt ist.

Der erste Welt-Wasser-Entwicklungsbericht der Vereinten Nationen (WWDR 2003) mahnt: „Zu Beginn des 21. Jahrhunderts steht die Erde mit ihren vielfältigen und reichen Lebensformen einschließlich mehr als sechs Milliarden Menschen vor einer ernsthaften Wasserkrise. Alle Anzeichen weisen darauf hin, dass sie sich zunehmend verschärft und diese Entwicklung noch weiter anhalten wird, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Krise ist eine Krise des Wassermanagements, verursacht im Wesentlichen durch unsere falsche Bewirtschaftung von Wasser.“ In Zukunft wird die Zahl der Länder des Südens, in denen Süßwasser Mangelware ist, steigen. Wichtige Gründe sind neben den Auswirkungen erheblicher Klimaveränderungen der stetig steigende Wasserbedarf und -verbrauch sowie das anhaltende Bevölkerungswachstum.

In den Gesellschaften des Nordens prägt angesichts wachsender Ansprüche an die Wasserressourcen und ihrer zunehmenden Mehrfachnutzung vor allem Nachhaltigkeit die Diskussionen. Die Süßwasservorkommen werden darüber hinaus durch Verschmutzung weiter verringert. Einstellungs- und Verhaltensprobleme sind es, die den Kern der Wasserkrise ausmachen. Methoden zur nachhaltigen Nutzung dieser natürlichen Ressource, u. a. von Wasser mit Trinkwasserqualität, sind auf allen Einsatz- bzw. Anwendungsgebieten gesucht.

Nach einer Studie der Weltbank (1995) ist der Trinkwasserpreis in Deutschland trotz des hohen nutzbaren Wasserdargebots (www.forum-trinkwasser.de) im internationalen Vergleich zu teuer (Kluge et al. 2001).

Das Frischwasser für die Gemüsereinigung muss oft bei steigenden Preisen extern bezogen oder aus dem Grundwasser entnommen werden. Daher gewinnt die Frischwasser- und Energieeinsparung bei der Gemüesewäsche nicht nur aus ökologischen sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten immer mehr an Bedeutung.

Ein Bereich, wo relativ große Mengen an Frischwasser benötigt werden, ist die Strahlreinigung von Oberflächen mit reinem Wasser. Das Reinigen von Oberflächen mit dem Wasserstrahl als eine seit den 60er Jahren eingesetzte umweltfreundliche Technologie steht aufgrund des unzureichenden Grundlagenwissens einer verminderten Verbreitung in neuen bzw. breiteren Anwendungsbranchen entgegen (Milchers 2001). Trotz des langjährigen Einsatzes der Strahlreinigungstechnologie in der Lebensmittelindustrie gibt es wenig Forschung, die auf die Analyse der Reinigungsleistung oder das Entwickeln von verbesserten Sprühmethoden gerichtet ist. Der Mangel an angewandten und grundlegenden Analyseergebnissen hat die Verbesserung der Waschleistung erschwert (Scott et al. 1981). Ein Grund dafür können die Schwierigkeiten sein, die mit der Messung der Leistung der Strahlreinigung verbunden sind (Schlusser 1970, Scott et al. 1981).

Ein Aspekt der Strahlreinigungstechnologie, der bis heute wissenschaftlich nicht näher untersucht wurde, ist der Gemüsewaschprozess im Niederdruckbereich. Über die Prozessparameter, welche den Gemüsewaschprozess maßgeblich beeinflussen, sind nur wenige Ansätze bekannt. Unzureichend an die abzutragende Verschmutzung und das Produkt angepasste Waschdüsen und Betriebsbedingungen erhöhen jedoch den Wasser- und Energieverbrauch und können Qualitätsbeeinträchtigungen durch Oberflächenbeschädigung am Frischgemüse verursachen. Die mit der eingesetzten Düsengeometrie nicht korrelierende Einstellung der Betriebsparameter führt zur Verschwendung von Aufprallenergien und somit zu einer Verschlechterung der Reinigungsqualität des Strahls. Für Praktiker sowie Maschinenbauer gibt es bisher kaum Entscheidungshilfen zur Auswahl der geeigneten Niederdruckdüsen bzw. zur Anpassung der Strahlparameter beim Gemüsewaschprozess.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Frage zu beantworten: wie kann das Strahlreinigen für die Gemüsewäsche optimiert und praktisch umgesetzt werden, um das Erdmaterial von Gemüse durch Bildung energetisch wirksamer Strahleigenschaften effizient und produktschonend abzutragen?

2. Zielstellung und Aufgaben

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist zunächst, die Eigenschaften von verschiedenen Strahlausbildungen sowie das Potential der Strahlen zum Materialabtrag in Variation der relevanten Düsen- und Betriebsparameter zu untersuchen. Die Makro- und Mikrostrukturen der Strahlen in der Umgebungsluft und die daraus resultierende Materialbeanspruchung werden unter Laborbedingungen quantitativ erfasst und bewertet, um aus den daraus gewonnenen abtragsrelevanten Gesetzmäßigkeiten die optimierten Reinigungsparameter im Niederdruckbereich zu ermitteln. Dabei soll das Abtragsergebnis mit einem Minimum an eingesetzter spezifischer Energie und Zeit verwirklicht werden.

Experimentelle Untersuchungen geben Ansätze zur Strahlanwendung für eine effektive und produktschonende Gemüsewäsche. In dem Zusammenhang ist eine objektive Bewertung der hydromechanischen Druckbelastung möglich und damit der Reinigungsleistung bzw. des Schädigungspotentials während des Aufpralls der Strahlen auf die Gemüseoberflächen.

Die Untersuchungen berücksichtigen auch die der Gemüsereinigungstechnik üblichen Randbedingungen. Die gekoppelte Ergebnisanalyse der Grundlagen- und Praxisuntersuchungen soll dazu dienen, durch Ableitung der abtrags- bzw. reinigungsrelevanten Größen der veränderbaren Betriebs- und Düsenparameter eine effizientere Strahlanwendung unter Beachtung der Wasser- und Energieeinsparung während des Gemüsewaschvorganges zu erzielen.

Die wesentlichen Teilziele dieser Arbeit sind:

- a. Ermittlung der grundlegenden hydrodynamischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern und den gebildeten Mikro- sowie Makrostrukturen der Strahlen
- b. Erarbeitung standardisierter Testverfahren zur Charakterisierung der abtragsrelevanten Strahlausbildungen auf Grundlage einer energetischen Betrachtung der Einzeltropfen im Strahl
- c. Aufbereitung und statistische Auswertung der gewonnenen Messdaten mittels geeigneter Auswertungsprogramme
- d. Erarbeitung grundlegender Erkenntnisse über die Empfindlichkeit (Beschädigungsgrenze) von verschiedenen Gemüsearten gegenüber mechanischen Strahlbelastungen
- e. Bestimmung und Bewertung des Effektivitätsgrades der Strahlen bei der Gemüsereinigung unter Labor- und Praxisbedingungen
- f. Ableitung von Grundsätzen zur Auswahl geeigneter Waschdüsen unter Definition der aufgabenorientierten Einstellgrößen der veränderbaren Betriebsparameter für eine effektive und produktschonende Gemüsewäsche
- g. Erarbeitung eines allgemeinen Bewertungsschlüssels von Düsen bzw. Wasserstrahlen für eine effizientere Gemüsewäsche unter praxisnahen Betriebsbedingungen
- h. Analyse verschiedener Möglichkeiten zur Steigerung der Strahleffizienz im Hinblick auf die Frischwasser- und Energieeinsparung während der Gemüsereinigung sowie
- i. Erarbeitung von Vorschlägen zur Optimierung der Düsenkonfiguration bezüglich des Zerfallsverhaltens des Wasserstrahls und dessen Wirkungsgrades auf der Aufprallfläche

3. Stand der Forschung und der Technik

In diesem Abschnitt werden zunächst ausgehend von der DIN 8580 (2003) die konventionell üblichen Trenn- und Reinigungsverfahren strukturiert und der Begriff des Strahlreinigens definiert. Im Rahmen der theoretischen Betrachtungen werden die sich aus Literaturstudien ergebenden, grundlegenden Ansätze zur Beschreibung der verfahrenstechnischen Trennvorgänge bei der Anwendung von Wasserstrahlen dargelegt. In einem nächsten Schritt werden ausgehend von der zeitlichen Entwicklung der Strahltechnik die wesentlichen anwendungsorientierten Untersuchungen auf dem Gebiet des Strahlreinigens erörtert.

Im Anschluss werden wesentliche Prozessparameter sowie Anforderungen an die Niederdruckstrahlen zur schonenden und intensiven Reinigung, angepasst an den Einsatzfall des Gemüsereinigens, herausgearbeitet.

3.1. Definition des Strahlreinigens

Nach DIN 8580 wird das Fertigungsverfahren *Trennen* (Hauptgruppe 3) in sechs Gruppen eingeteilt. Innerhalb dieser trennenden Fertigungsverfahren sind, wie in **Bild 3.1** dargestellt, die Verfahren *Abtragen* und *Reinigen* verankert.

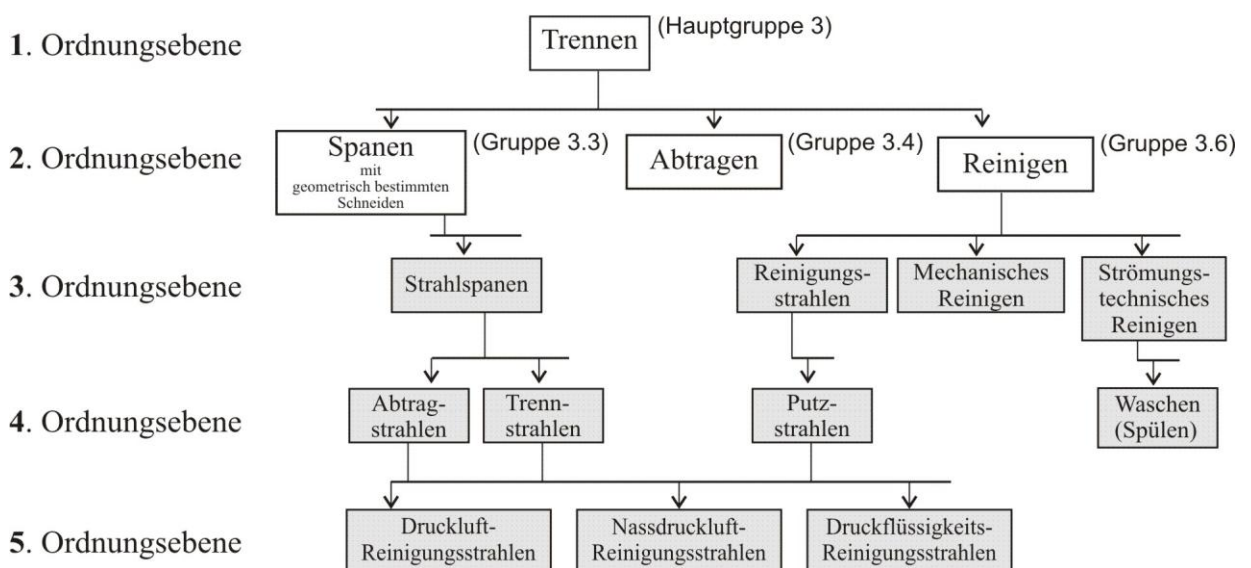


Bild 3.1 Systematischer Überblick von Reinigungsverfahren nach DIN 8580, DIN 8592 und DIN 8200

Das Fertigungsverfahren *Abtragen* wird als nichtmechanisches Trennverfahren nach DIN 8590 (2003) nur in das thermische, chemische und elektrochemische Abtragen untergliedert. Die Einteilung der Reinigungsverfahren in DIN 8592 (2003) erfolgt nach dem physikalischen Wirkprinzip neben dem Lösemittelreinigen, dem chemischen und thermischen *Reinigen* in Reinigungsstrahlen, mechanisches und strömungstechnisches *Reinigen*.

Augenmerk ist dabei auf vorliegende Kombinationen verschiedener Wirkmechanismen bei einigen Strahlverfahren gelegt worden.

Bei der weiteren Unterteilung der Strahlverfahren werden nach dem Anwendungszweck des Strahlens die Begriffe *Abtrag-* und *Trennstrahlen* unter das *Strahlspanen* sowie *Putzstrahlen* unter das *Reinigungsstrahlen* in das Ordnungsschema nach DIN 8200 (1982) eingeordnet.

Die festgelegte Einteilung ist dennoch nicht detailliert und eindeutig genug, eine direkte Kombination der abtragenden und reinigenden Strahlzwecke durch unter Druck stehende Flüssigkeiten abzuleiten, auch in einer Verfahrensverknüpfung, sowie einzelne Reinigungsverfahren gegeneinander abzugrenzen.

Weitere Einteilung der Strahlverfahren nach dem Strahlsystem als Druckluft-, Nassdruckluft- sowie Druckflüssigkeits-Reinigungsstrahlen erfolgt auch in DIN 8200.

Eine weitere Möglichkeit, alle Trennverfahren grundlegend zu klassifizieren, entwickelten Plötner et al. (1991). Danach werden verschiedene Trennverfahren nach ihren physikalischen Ursprüngen aus den Gebieten der *klassischen* und der *modernen* Physik gegliedert. Diese können wiederum hinsichtlich der einzelnen Anwendungsgebiete in mechanische und nicht-mechanische Verfahren aufgeschlüsselt werden. Der Wasserstrahl ist als ein hydro-mechanisches Trennverfahren dem Gebiet der klassischen Physik zuzuordnen.

Die Wasserstrahlreinigung wird für ein vielfältiges Spektrum von Verunreinigungen und Reinigungsgütern angewendet. Bei dieser Reinigungstechnik als branchenübergreifendes Arbeitsfeld kommen entsprechend dem Verwendungszweck und der Empfindlichkeit der zu reinigenden Substratoberfläche Strahlen im Hoch- und Niederdruckbereich zum Einsatz.

Für eine Definition des Wasserstrahlreinigens wird in Anlehnung an die DIN 8592 und DIN 8200 der folgende Wortlaut vorgeschlagen:

Wasserstrahlreinigen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem der Strahl bestehend aus reinem Wasser in einem Strahlgerät (Düse) mit Hilfe eines Strahlsystems (Druckerzeugung) beschleunigt und zum Aufprall auf die zu reinigende Oberfläche eines Strahlgutes gebracht wird. Dabei besteht der Zweck des Strahls in der Trennung der abzutragenden Verunreinigungen von der Oberfläche des Strahlgutes durch materialspezifische Belastungsintensität infolge spezifischer Normal- und Schubkräfte des aufprallenden Strahls.

3.2. Grundlegende Betrachtungen bisheriger Erkenntnisse aus den Strahlstudien

Die Trennvorgänge sind nach Milchers (2001) aus den Teilprozessen des Strahlzerfalls, des Strahlaufpralls, der dynamischen Belastung, Schädigung und Erosion des abzutragenden Materials zusammengesetzt.

Hier ist es von besonderem Interesse, die Mechanismen zu identifizieren, die maßgeblich den effizienteren Materialabtragsprozess steuern, wenn ein Material den Aufprallbelastungen des Strahls unterworfen wird.

Aufbau und Eigenschaften von Freistrahlen und die komplexen, durch eine Vielzahl von Einzelprozessen gekennzeichneten Abtragsprinzipien von Wasserstrahlen werden erläutert.

3.2.1. Strahlzerfall

Der Strahlzerfall unter Normaldruck ist Gegenstand einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen, empirischen Ansätzen und mathematischen Modellen. Die zahlreichen Untersuchungen reichen bis Rayleigh (1878) zurück. Nach Rayleigh zerfällt ein zähigkeitsloser Strahl bei geringer Austrittsgeschwindigkeit unter dem Einfluss rotationssymmetrischer Schwingungen. Weber (1931) hat die Theorie Rayleigh auf zähe Flüssigkeiten erweitert und dabei den Strahlzerfall ohne und mit Lufteinfluss untersucht (Schmidt 1980).

Die Weberzahl We charakterisiert den relativen Einfluss von Trägheitskräften auf den Zerfall im Vergleich zu Oberflächenkräften. Die Theorie Weber's ist durch zahlreiche Forscher erweitert worden, um den Zerfall hochbeschleunigter Strahlen unter dem Einfluss der umgebenden Luft zu erklären (v. Ohnesorge 1936, Tanasawa & Toyoda 1955, Miesse 1955, Fraser et al. 1962, Reitz & Bracco 1982). Von Ohnesorge (1936) beschrieb die Grenzbereiche der

verschiedenen Zerfallsbereiche, die in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re und der Ohnesorgezahl Oh eingegliedert werden (**Bild 3.2**). Die dominierenden, auf den Strahl einwirkenden Kräfte resultierend aus der Variation der Betriebsbedingungen unterscheiden sich u. a. in der Steigerung der Strahlaustrittsgeschwindigkeit (Schmidt 1980, Schneider 1995, Fath 1997, Liu 2000). Auskunft über die Größenordnung der beim Zerfall eines flüssigen Strahles beteiligten Kräfte geben v. Ohnesorge (1936) und Troesch (1954).

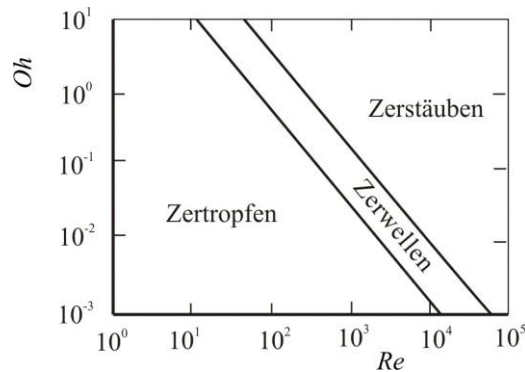


Bild 3.2 *Grenzbereiche der verschiedenen Strahlzerfallsbereiche unter atmosphärischen Bedingungen nach v. Ohnesorge (1936)*

Die meisten technischen Strahlanwendungen liegen im Bereich der Zerstäubung, in dem die Tropfen möglichst geringe Durchmesser und eine enge Größenverteilung aufweisen.

Die Zerstäubungsmechanismen von Strahlen wurden in der Vergangenheit aufgrund ihres zunehmenden Gebrauches in der Verbrennungstechnik und in der chemischen und landwirtschaftlichen Verfahrenstechnik intensiven Studien unterzogen (Haenlein 1931, Dombrowski et al. 1959, Fraser et al. 1962, Dombrowski 1963, Brauer 1971, Zaske (1973), Schmidt & Walzel 1980, Selcav & Göhlich 1982, Spillman 1984, Wu et al. 1992, Fath & Leipertz 1997, Krüger 1998 und Ludewig 1998).

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Fluidzerstäubung und Sprühvorgänge“ (www.sla.maschinenbau.tu-darmstadt.de/dfgspp/projekte.ger.html 2001) wird an der experimentellen Erfassung wichtiger strömungsmechanischer Größen in der Düse und der experimentellen Charakterisierung des primären Strahlzerfalls gearbeitet.

Praktische Zerstäubungssysteme verwenden eine Vielzahl von Mechanismen, um die für den Zerfall notwendige, kritische Weberzahl We_k zu erzielen. Über der We_k treten Schwingungen, Störungen und folglich der Zerfall von Strahlen auf (Schikorr 1986, Sirignano 1999, Liu 2000). Bei Strahlen hoher Relativgeschwindigkeiten v_r tritt nach Hänlein (1931) und v. Ohnesorge (1936) eine Zerstäubung ein, welche nach Oguey (1951), Grant und Middleman (1966), Phinney (1966) und Ruff et al. (1989) auf die innere Strahl-turbulenz zurückzuführen ist.

Bei den Druckdüsen, in denen die potentielle Druckenergie (Pumpendruck) in kinetische Energie umgewandelt wird, hängt die kritische Weberzahl We_k von der v_r zwischen Strahl und Umgebungsluft ab. Der Strahl, der bei einem Spritzdruck $p = 10$ bar mit einer Geschwindigkeit von 45 m s^{-1} aus einer Düse mit einem Durchmesser d_d von 1,5 mm austritt, weist die Re von $6,8 \times 10^4$ auf. Der Wechsel von laminarer in turbulente Strömung findet statt bei einer Re

von ca. $2,3 \times 10^3$ (Krautter & Vetter 1990). Bei den in der Studie von Schneider (1995) erreichten hohen Re ($Re > 5 \times 10^4$) wird die Flüssigkeitsströmung besonders durch die Phänomene Turbulenz und Kavitation bestimmt. Diese strömungsdynamischen Phänomene beeinflussen die Strahlinstabilität, den Beginn des anschließenden Strahlzerfalls, der unmittelbar am Düsenausgang beginnt, und die Struktur der zerstäubten Strahlzone (Grant & Middleman 1966, Phinney 1966, Ruff et al. 1989, Tseng et al. 1992).

Das Verhältnis zwischen tatsächlicher und maximal erreichbarer Strahlgeschwindigkeiten v_s , welches durch den Widerstandsbeiwert μ ausgedrückt wird, liegt infolge von innerer Reibung in Druckdüsen zwischen 0,5 und 0,95 (Schneider 1995).

Nach Wu et al. (1992) hatte bei der Zerfallsanalyse im düsennahen Strahlbereich mittels Holographie die Variation der Dichte der Umgebungsluft geringen Einfluss auf die Tropfengröße des turbulenten Primärzerfalls. Die Autoren weisen auf die Unwesentlichkeit der aerodynamischen Effekte auf den primären Zerfall hin, der allein durch das Verhältnis der Dichten zwischen der Flüssigkeit und der Umgebungsluft gesteuert wird. Sie geben an, dass für Strahlen oberhalb von $\rho_F/\rho_L = 590$ die Wechselwirkung mit der Umgebungsluft vernachlässigbar ist und der primäre Strahlzerfall von der Strahlturbulenz bestimmt wird ($\rho_F/\rho_L = 830$).

Dieser primäre Strahlzerfall unmittelbar am Strahlaustritt ist mit Bedingungen verbunden, bei denen die Impulse der turbulenten Fluktuationen im Strahl ausreichen, um die Oberflächenspannungskräfte zu überwinden, so dass Tropfen gebildet werden können (Ruff et al. 1989).

Die Tropfenbildung tritt vorerst entlang der Seiten des Strahls auf und der Strahlkern mit der zusammenhängenden und kompakten Strahlzone wird vollständig von der zerstäubten Strahlzone umgeben (Ruff et al. 1989, Ruff et al. 1992, Tseng et al. 1992, Wu et al. 1992, Schneider 1995). Von dem Strahlkern reißen schrittweise Flüssigkeitsfragmente bzw. Tropfen ab (Milchers 2001), deren Querschnitt nach dem Modell von Schneider (1995) linear mit der Strahllänge h_s vom Düsenausgang abfällt.

Die Ergebnisse von Chehroudi et al. (1977) und Hiroyasu et al. (1982) zeigen, dass die Länge des Strahlzerfalls $h_{s,z}$ und der Querschnitt des Strahlkerns durch Turbulenz am Strahlaustritt beeinflusst wird, die in Abhängigkeit von der Düsengeometrie und der Dichte des umgebenden Gases variiert (Momber 1988, Arai et al. 1984, Milchers 2001). Die $h_{s,z}$ ist bis zu einer Grenze der Re , deren Wert nach Yanaida (1974) bei $Re = 4,6 \times 10^5$ liegt, der Strahlgeschwindigkeit umgekehrt proportional. Nach Überschreitung dieses Grenzwertes ist die Länge des Strahlzerfalls $h_{s,z}$ vom Düsenausgang unabhängig von den Parametern (Shavlovsky 1972, Yanaida 1974, Goldin et al. 1986). Nach Hiroyasu et al. (1982) und Arai et al. (1984) nimmt der $h_{s,z}$ mit zunehmender Strahlgeschwindigkeit v_s erst linear bis zu einem Maximum zu und mit weiter zunehmender v_s nimmt er wieder ab.

Entsprechend der Beobachtungen der zerstäubten Strahlzone im Düsennahbereich (Ruff et al. 1991, Tseng et al. 1992, Wu et al. 1992) hat die Strahloberfläche größere und meist ungleichmäßige Tropfen mit kleineren runden Tropfen in der Randnähe des Strahls. Die Bildung der kleineren Tropfen weist auf die bedeutsamen Effekte des sekundären Zerfalls hin, auch im Fernfeld der Düse (Liu 2000, Merker 2001, Milchers 2001). Der sekundäre Strahl- bzw. Trop-

fenzerfall erfolgt mit zunehmender h_s in Strahlrichtung durch die steigende Wechselwirkung mit der Umgebungsluft. Große Wirbelstrukturen in der Luftbewegung dringen in Abhängigkeit von der Strahlgeometrie in den Strahl ein und verwirbeln den Strahl (Liu 2000). Für den Tropfen ist hinsichtlich der Kräfte, welche zu einem Zerfall führen, der kritische Zustand erreicht, wenn die aerodynamische Reibungskraft F_r gleich der Kohäsionskraft F_σ ist. Zum aerodynamisch induzierten Strahlzerfall müssen ausreichende v_r zwischen Tropfen und Umgebungsluft existieren (Rupe 1979, Schneider 1995, Liu 2000, Milchers 2001).

Die axialen Geschwindigkeiten im Strahlkernbereich liegen nach Yanaida und Ohashi (1978) selbst in einem Abstand von $1000 d_d$ vom Düsenausgang noch im Bereich der Düsenströmungsgeschwindigkeit. Daher sind die Luftreibungseffekte aufgrund der aus den höheren v_r resultierenden starken Wechselwirkungen zwischen der Umgebungsluft und dem Strahl als hoch anzusehen. Dadurch steigt die Tropfenzahldichte mit größeren h_s zum Strahlaustritt. Mit der Verkleinerung des Tropfendurchmessers d_t wirken die Kohäsionskraft F_σ der Tropfen dominierend. Dies zeigt, dass es einen Grenzwert der geringsten Tropfengröße gibt, der durch den Zerfall erzeugt wird (Sirignano 1999, Liu 2000).

Die Simulation des Zerfalls eines axialsymmetrischen Strahls ergab (Milchers 2001), dass die Tropfenzahlkonzentration in der Nähe des Strahlkerns am höchsten ist und die Verteilung mit Zunahme des Radius zur Strahlachse r_s abflacht. Der Sauter-Durchmesser d_{32} der Tropfen, bei dem das Verhältnis zwischen dem Gesamtvolumen des Wasserstrahls und der Gesamtoberfläche aller Tropfen dem Mittel aller Tropfen entspricht, ist in der Nähe der Strahlachse am größten und fällt mit zunehmendem r_s ab. Dieser charakteristische d_{32} einer Tropfengrößenverteilung kann nach **Gleichung 3.1** von Schmidt und Walzel (1984) bzw. Richter und Wilhelm (1991) unter Einbeziehung der angewendeten Prozessparameter bestimmt werden.

$$d_{32} = We^{-0,5} (\rho_L / \rho_F)^{-0,25} (1 + 3,3 Oh) d_d \quad (3.1)$$

Die Beziehung (**Gl. 3.1**) ergibt sich aus der Dichte von Wasser ρ_F und Luft ρ_L , der Weberzahl We , der Ohnesorgezahl Oh sowie dem Düsendurchmesser d_d . Sie verdeutlicht u. a., dass der Tropfendurchmesser d_t linear mit dem d_d zunimmt.

Die **Gleichung 3.2** gilt mit Hilfe des Korrelationsansatzes von Dombrowski und Munday (1968) für Wasserstrahlen der Flachstrahldüsen, die neben der Dichte ρ_F und Oberflächenspannung σ_F des Strahls auch die Durchflussrate Q als eine Funktion des p und d_d und die Strahlfläche A_s berücksichtigt. Der Einfluss der Viskosität ν von Wasser ist nicht einbezogen.

$$d_{32} = 4,78 \cdot 10^{-6} A_s (\sigma_F / (\sin \theta_s \rho_F Q^2))^{1/3} \quad (3.2)$$

Zur Charakterisierung der Strahlzerfallprozesse werden $h_{s,z}$ und Tropfengrößenverteilung als wichtige Parameter betrachtet (Liu 2000). Durch geeignete Prozessparameter kann der Zerfallmechanismus entweder verstärkt oder abgeschwächt und auf die für den Anwendungsfall erforderlichen Bedingungen angepasst werden. In vielen praktischen Einsatzgebieten, u. a. in der Verbrennungstechnik, bei der Sprühlackierung und in Sprühwäschern, sind Strahlen mit

möglichst geringem Tropfendurchmesser d_t und deren schmalen Häufigkeitsverteilungen gefordert (Dombrowski et al. 1959, Liu 2000, Brenn & Prebeg 2001, Sommerfeld 2001).

An das erzeugte Tropfenspektrum werden je nach Anwendungsfall ganz gezielte Anforderungen gestellt, da die Wirkungscharakteristika u. a. davon bestimmt werden. Es bedarf daher genauer Kenntnisse über die Tropfengrößenverteilung durch experimentelle Untersuchungen des Strahlzerfalls an Düsen.

3.2.2. Aufbau und Eigenschaften des Reinigungsstrahls

Der sich nach dem Düsenausgang bildende Freistrahle ändert sich in seinen geometrischen Abmessungen und strömungsmechanischen Eigenschaften infolge von Reibung mit der Umgebungsluft und den inneren Turbulenzen in Strahlrichtung. Die Beschreibung des Strahlreinigungsprozesses und dessen Phänomene sind daher nur bei Kenntnis über den Aufbau der Freistrahleströmung in longitudinaler und transversaler Richtung möglich. Es treten wichtige strömungsdynamische Phänomene unterschiedlicher Art im Strahl auf. Es erfolgen integrierte Austausche der Masse, des Impulses und der Energie vom Tropfenstrahl mit der Umgebungsluft (Sirignano 1999).

Frühere Strahlstudien haben gezeigt, dass die Strahldynamik durch den turbulenzinduzierten Primärzerfall unmittelbar am Strahlaustritt beeinflusst wird. Die Anfangsbedingungen des turbulenten Strahls beeinflussen die Vermischungsrate mit der Umgebungsluft, den sekundären Zerfall, die Tropfenkollision und die diskreten Strömungen innerhalb der zerstäubten Strahlzone (Wu et al. 1992). Dabei spielt die Düsengeometrie eine entscheidende Rolle, welche bei Rundstrahldüsen mit zunehmendem Verhältnis zwischen Düsenlänge und Düsendurchmesser $l_d/d_d > 10$ einen kohärenter werdenden Strahl produzieren (Milchers 2001). Die strömungsdynamischen Verhältnisse in der Düse bewirken bei kürzeren Düsen sowie bei Düsen mit geringerem d_d aufgrund der größeren radialen Geschwindigkeitsgradienten ein Maximum an Turbulenz, was bereits nach Verlassen der Düse ein Aufreißen des Strahls verursacht (Schneider 1995, Liu 2000, Milchers 2001) und auf den Strahlwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ und somit auf die Strahlausbreitung erhebliche Einflüsse hat (Liu 2000, Merker 2001). Ein vergrößerter $\theta_{s,h=f(z)}$ aufgrund hoher Turbulenz am Strahlaustritt erhöht das Verhältnis zwischen der radialen und axialen Geschwindigkeitskomponente des Strahls (Liu 2000).

Durch Strahluntersuchungen in kinematischen Betrachtungen, durch Untersuchungen zum Anteil an in den Strahl eingedrungener Luft und zur Dichte der Strahlflüssigkeit wurden verschiedene Strahlbereiche in Strahlrichtung (axial) ermittelt (Shavlovsky 1972, Yanaida 1974, Davis & Jacson 1981). Demnach kann der Strahl in drei Strahlbereiche gegliedert werden (**Bild 3.3**): (I) *Anfangsbereich*, (II) *Hauptbereich* und (III) *Endbereich* (Yanaida 1974, Yanaida & Ohashi 1980, Zou et al. 1985).

Weitere Unterteilungen der Strahlausbildung in charakteristische Strahlbereiche wurden von Tambour (1985) in *Nahbereich*, *Fernbereich* und *voll zerstäubter Fernbereich* und von O'Rourke (1981) in *dicht*, *dünn* und *sehr dünn* vorgenommen. Darin werden die Unterschiede der Größen und Geschwindigkeitsverteilungen der Tropfen bzw. der Dichte des

Strahls ρ_F gegenüber der Dichte der eingedrungenen Luft ρ_L in Abhängigkeit von Strahllänge h_s stromabwärts beschrieben.

Der Strahl im *Kern-*, *Anfangs-* (vgl. **Bild 3.3**) oder *Nahbereich* wird als ein zusammenhängender Strahl mit kleinem Luftanteil innerhalb des Strahls betrachtet (Meng et al. 1997). Der Anfangsbereich mit zusammenhängender Strahlzone umfasst den Kernbereich und einen Übergangsbereich (Yanaida & Ohashi 1978). Das Geschwindigkeitsprofil des Strahls unmittelbar am Düsenausgang kann über den gesamten Strahlquerschnitt als konstant angesehen werden. Die in diesem Bereich entstehenden Wirbelbildungen bewirken dann eine fortwährende Vermischung zwischen Strahl und Luft. In den Strahl eingedrungene Luft verursacht den Zerfall des stetigen Strahls in einzelne Tropfen und die Verringerung der Tropfengeschwindigkeiten v_t (Meng et al. 1997, Surma & Friedel 2003). Die v_t der im Nahbereich gebildeten Tropfen sind weitgehend unabhängig vom Tropfendurchmesser d_t (Milchers 2001). Die Messwerte der v_t verdeutlichen, dass die mittleren v_t ab einer Strahllänge h_s von $1,5 d_d$ mit einem höheren Luftanteil des Strahls exponentiell abnehmen. Die v_t bleibt mit einem niedrigen Luftanteil bis 17% stets auf einem höheren Niveau als mit einem Luftanteil von 42%. Sie fällt vom Strahlkern radial zum Strahlrand exponentiell ab. Die Strahlgeschwindigkeitsverteilung nimmt die Form einer Gaußkurve an, wenn der Querschnitt der zusammenhängenden Strahlzone mit zunehmender Strahllänge h_s gegen Null geht (Surma & Friedel 2003).

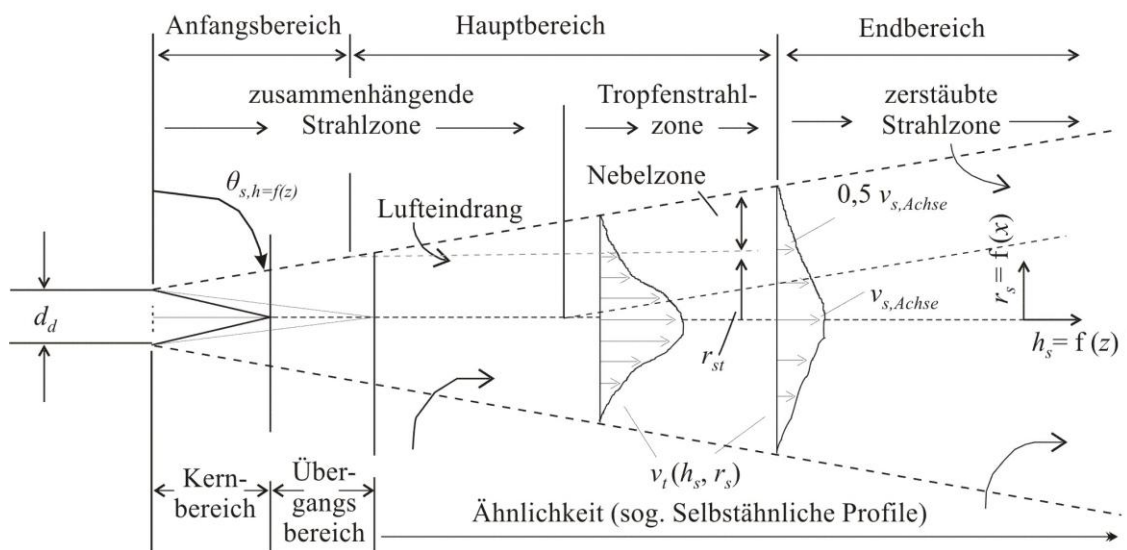


Bild 3.3 Schematische Darstellung der Strahlstruktur, verändert nach Yanaida & Ohashi (1978)

Mit größer werdender h_s stromabwärts entsteht eine sowohl radialsymmetrisch in die Umgebung als auch zur Strahlachse hin anwachsende Vermischungszone. Es bildet sich ein Kompaktstrahl aus, dessen Geschwindigkeitsprofile breiter und flacher werden. Unterstützt durch die Reibung mit der in den Strahl eingedrungenen Luft nimmt der Querschnitt der kompakten Strahlzone mit fortschreitender h_s zum Strahlaustritt ab (Meng et al. 1997, Surma & Friedel 2003). Nach Messungen von Arai et al. (1984) und Cheroudi et al. (1985) wird die Beziehung für den Abstand des Kompaktstrahls $h_{s,kompakt}$ mit **Gleichung 3.3** angegeben,

$$h_{s,kompakt} = k d_d \sqrt{\rho_F / \rho_L} \quad (3.3)$$

wobei die Konstante k den Wert 7,15 (Cheroudi et al. 1985) bzw. 15,8 (Arai et al. 1984) besitzt. Danach hat ein Wasserstrahl ($\rho_F = 1 \text{ g mm}^{-3}$), der in die unkomprimierte Luft ($\rho_L = 1,2 \times 10^{-3} \text{ g mm}^{-3}$) eingespritzt wird, einen Kompaktstrahl mit einem $h_{s,kompakt} = 200$ bis $500 d_d$ (Milchers 2001). Von Shavlovsky (1972) wird für das Ende des Kompaktstrahls das 90- bis 600fache des Düsendurchmessers d_d angegeben.

Bei der Zerstäubung aus kleinen Düsen ($d_d = 0,2 \text{ mm}$) austretenden Strahlen existiert ein Kompaktstrahl (Arai et al. 1984 und Cheroudi et al. 1985).

Im *Hauptbereich* des Kompaktstrahl- und radial zunehmendem Tropfenstrahlanteils (vgl. **Bild 3.3**) setzen sich das Durchmischen des Strahls mit der Luft sowie der Strahlzerfall in Tropfen und die Strahlausweitung aufgrund des Effekts der stetigen Interaktion der beiden Phasen fort. Mit der weiteren Vergrößerung der h_s weicht der Kompaktstrahl dem Tropfenstrahl. Die gesteigerte Wechselwirkung zwischen den Phasen verursacht eine Verringerung der Strahlgeschwindigkeit v_s , die im Hauptbereich ein parabolisches Profil aufweist (Meng et al. 1997). Ludewig (1997) ermittelte die Gesetzmäßigkeit, dass die v_t mit zunehmender Tropfengröße höher wird, da infolge des Luftwiderstands insbesondere kleine Tropfen stark abgebremst werden. Zwischen dem gebildeten Tropfenstrahl und der umgebenden Luft entsteht im Hauptbereich eine Nebelzone mit sehr feinen Tropfen, die durch Null-Geschwindigkeit gekennzeichnet sind (Meng et al. 1997). Nach der Untersuchung von Yanaida und Ohashi (1976) ist der Radius des Tropfenstrahls r_{st} linear proportional zur Strahllänge h_s .

Der nachfolgende *Endbereich* besteht ausschließlich aus einem mit Luft durchmischten, zerstäubten Strahl, in dem keine zusammenhängende Strahlstruktur existiert (Meng et al. 1997). Die Tropfen und die umgebende Luft erreichen das Gleichgewicht. In diesem voll zerstäubten Fernbereich gelangen u. a. die mittleren Geschwindigkeiten und die Scherbelastung zu sog. selbstähnlichen radialen Profilen.

Bei Betrachtung der Tropfenkollision und der Koaleszenz besteht im Nahbereich aufgrund der höheren Tropfendichte eine hohe Wahrscheinlichkeit der Tropfenkollision. Die Tropfendichte wird durch das Verhältnis des Zwischenabstandes zum d_t gleich oder kleiner als 10 angegeben. Die aus der Kollision resultierenden Dehnungen, Verformungen und der Zerfall der Tropfen verursachen den Verlust an kinetischen Tropfenenergien (Sirignano 1999, Liu 2000). Hohmann et al. (1994) zeigen mit ihren Untersuchungen, dass die Änderung von Strahleigenschaften, wie die Zunahme der Tropfendurchmesser d_t oder die Abnahme der Tropfenanzahldichte, mit zunehmender Strahllänge h_s durch Koaleszenz verursacht wird.

In einer h_s vom Düsenausgang von $100 d_d$ liegt ein gesteigerter Luftanteil in einem Zweiphasenstrahl vor. Der Strahl wird sehr dünn, das Verhältnis des Zwischenabstandes zum d_t ist hier größer als dreißig, und die Wahrscheinlichkeit einer Tropfenkollision oder einer Koaleszenz sinkt (Liu 2000, Surma & Friedel 2003). Die kohärente Struktur des Tropfenflusses geht verloren, weil der Zeitabstand zwischen benachbarten Tropfen größer wird (Frohn & Roth 2000).

In Abhängigkeit der Strahlbereiche variieren der Grad der Interaktion und die Wechsel-

wirkung des Masse-, Impuls- und Energieaustausches zwischen den Tropfen und der Umgebungsluft. Infolgedessen wird das Strahlverhalten bedeutend beeinflusst durch die dominierenden Faktoren der strömungsdynamischen Phänomene einzelner Bereiche (Wu & Kim 1995). Aus diesem Grund unterscheiden sich z.B. Studien mit ablagerungsorientierten Strahlen von Studien mit verbrennungsorientierten Strahlen. Während eine komplette Verbrennung des Kraftstoffstrahls im Nah- oder Anfangsbereich auftreten kann, müssen sich abzulagernde Tropfen im Strahl vor ihrem Auftreffen auf die Oberfläche über eine Entfernung von der Düse weg bewegen (Giles & Ben-Salem 1992).

Zur Bestimmung der wirkungsvollen Strahllänge h_s für die hydraulische Reinigung ist somit das Verständnis der relevanten Strahldynamikphänomene und den daraus resultierenden Modifikationen der Strahleigenschaften notwendig.

3.2.3. Vorgänge beim Strahlaufprall und bei Belastungen der Materialien

Die Aufpralldynamik von hochbeschleunigten Flüssigkeitsstrahlen und Tropfen auf trockene bzw. mit Flüssigkeitsfilmen bedeckte feste Oberflächen ist Gegenstand einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen, empirischen Ansätzen und mathematischen Modellen (Heymann 1969, Huang et al. 1973, Hammit et al. 1974, Rochester & Brunton 1979, Adler 1979, Walzel 1980, Liu 2000, Milchers 2001 und Sivakumar & Tropea 2002).

Nach den im Abschnitt zuvor dargestellten Zusammenhängen lässt sich der Strahl in Abhängigkeit von den Prozessparametern in drei Zonen unterteilen: zusammenhängender, kompakter und zerstäubter Strahl. In Abhängigkeit vom Arbeitsabstand h_a bewirken diese verschiedenen Strahlzonen auf das abzutragende Material unterschiedliche Belastungen.

Folgende Druckbelastungen werden beim Strahlreinigungsvorgang eines Materials unterschieden (Momber 1993, Wu & Kim 1995, Milchers 2001):

- a. *Stoßdruck* $p_{stoß}$, der als dynamische Belastung durch Kompression der aufprallenden Einzeltropfen entsteht.

Der mit der v_t axial aufprallende Tropfen wird mit der Verformung der Materialfläche vollständig abgebremst. Im Tropfen entsteht ein geschlossener Druckraum, in dem sich Stoßwellen ausbilden und zeitlich sich sehr schnell ändernde Druckverteilungen ablaufen können. Nach Messungen der Druckverteilung in der Kompressionszone von Skalak und Feit (1966) und Rochester et al. (1979) wird der Maximalwert des kurzzeitig wirkenden Stoßdruckes $p_{stoß}$ an der äußeren Kompressionszone des Tropfens erreicht. Zur Mitte der Kompressionszone hin fällt der Druck etwa auf den Wasserhammerdruck p_{wh} ab.

Springer (1976) und Adler (1979) zeigen, dass die Belastung dem messtechnisch erfassbaren p_{wh} gleich ist, wenn die Tropfengeschwindigkeit v_t zur Aufprallfläche senkrecht und der Radius der Kompressionszone am höchsten ist (Louis et al. 2000).

- b. *Staudruck* p_{stau} , der sich nach dem raschen Stoßdruckabfall als quasistatische Belastung bei radialem Abströmen der Tropfenflüssigkeit, sowie als dynamische Belastung beim Aufprall des zusammenhängenden Strahls ergibt.

Aus dem Staudruck heraus beginnt das radiale Abströmen der Tropfenflüssigkeit mit einer Geschwindigkeit, die das 3- bis 5-fache der Aufprallgeschwindigkeit v_t erreichen kann. Aus der Gleichung $[p_{stau} = 0,5 \rho_F (v_t^2 - (v_t^2 \sin \theta_s))]$ lässt sich ableiten (Milchers 2001), dass die tangential zur abzutragenden Materialfläche aufprallenden Tropfen und deren radial abströmende Flüssigkeit höhere Staudrücke aufweisen.

c. *Spezifische Druckbelastung* als eine Summe aus vielen Einzelereignissen (Tropfenstoßschlag, Staudruckwirkung und Erosion), welche sich aus der Anzahl der wirkenden Tropfenaufschläge pro Flächen- und Zeiteinheit ergibt.

In **Bild 3.4** ist mit Hilfe von vier Stufen der Verlauf vom Einzeltropfenschlag bis zum zusammenhängenden Strahl dargestellt.

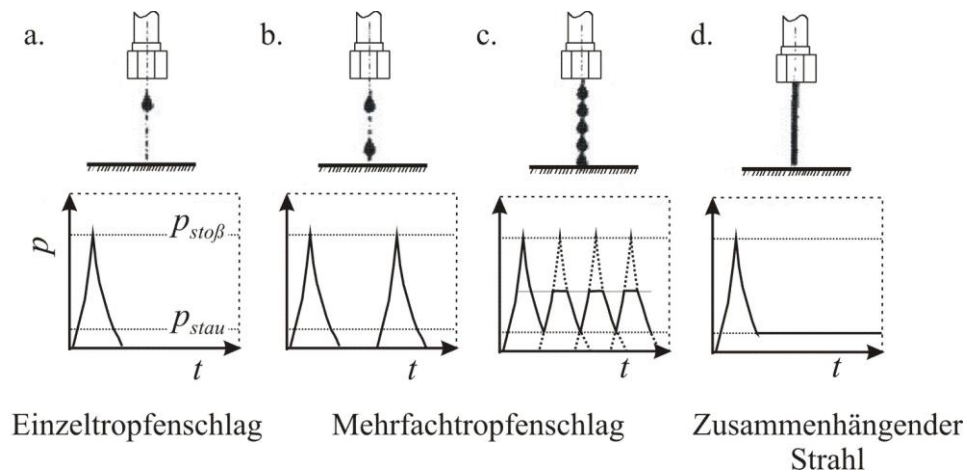


Bild 3.4 Druck-Zeit-Verlauf bei unterschiedlichen Strahlzusammensetzungen nach Kroos (1995)

Das abzutragende Material wird im realen Reinigungsprozess nicht nur durch einen einzelnen Tropfenschlag beansprucht (**Bild 3.4 a und b**). Vielmehr findet eine Vielzahl aufeinanderfolgender Tropfenschläge variabler Frequenz statt, die sich bis zur Bildung eines zusammenhängenden Strahls steigern können. Mit Ausnahme einiger Strahlanwendungen erfolgt der Aufprall eines einzelnen Tropfens auf einen dünnen flüssigen Film (**Bild 3.4 c**), der sich vom Aufprall der vorhergehenden Tropfen und deren noch nicht beendeten Abfließvorgangs angesammelt hat. Diese Tatsache ruft sofort einige Mechanismen hervor, durch die der Aufprall eines einzelnen Tropfens durch den Aufprall vom benachbarten Tropfen und/oder der vorhergehenden Tropfen auf der Oberfläche beeinflusst werden kann (Sivakumar & Tropea 2002). Der Verlauf des Druckes als Funktion der Zeit entspricht dem Fall einer quasistatischen Belastung in Höhe des Staudruckes mit überlagerten Stoßdruckwellen, da der auf der Oberfläche befindliche Flüssigkeitsfilm bereits bei sehr geringer Dicke die Aufprallintensität verringert. Beim Aufprallen eines zusammenhängenden Strahls (**Bild 3.4 d**), bei dem die Tropfen unendlich dicht aufeinander folgen, fällt der maximal auftretende Stoßdruck der Einzeltropfen steil ab auf den Staudruck. Dieser tritt bei höherer Anzahl der spezifischen Tropfenaufschläge pro Zeiteinheit, d. h. bei höherer Aufschlagfrequenz, als Maximalwert auf (Brunton 1967, Beutin

1975, Beutin et al. 1977). Ein Wasserfilm auf der Materialoberfläche bewirkt eine Dämpfung der Amplitude der Druckwellen bzw. der Aufprallwirkung (Adler 1967, Milchers 2001). Momentan existieren sehr wenige systematische Studien über Tropfeninteraktionen beim Aufprall oder über die Bedeutung solcher Wechselwirkungseffekte auf den daraus resultierenden Strahl, die u. a. die Unterschiede zum Aufprall eines unbeeinträchtigten Einzeltropfens vergleichen (Yarin & Weiss 1995, Cossali et al. 1999 und Sivakumar & Tropea 2002). Sivakumar und Tropea (2002) zeigen durch ihre Arbeit deutlich, dass der Aufprall eines Strahls nicht als Überlagerung von unbeeinträchtigten Tropfenaufschlägen behandelt werden kann.

Kurze Arbeitsabstände h_a sind gekennzeichnet durch einen mit der zusammenhängenden Strahlzone einhergehenden quasistatischen Staudruck. Größere h_a bewirken den Anstieg des r_{st} und veranlassen im abzutragenden Material eine hochdynamische Stoßbelastung der Tropfen ($P_{stoß}$). Diese optimale Materialbelastung erfolgt nahezu ausschließlich im Hauptbereich mit dem kompakten Tropfenstrahl, der durch kombinierte Druckbelastungen von statischen und dynamischen Anteilen gekennzeichnet ist. Der Tropfenstrahl stellt sowohl von der Kinetik möglicher Risseinleitung als auch von der Vielzahl praktischer Anwendungen den interessanten Extremfall der Beanspruchung dar (Louis 1978, Wu & Kim 1995, Meng et al. 1997).

Nach Yanaida & Ohashi (1978) wird der Strahl im Zusammenhang der Länge des Strahlzerfalls $h_{s,z}$ und des axialen Druckanteils durch drei verschiedene Strahlbereiche gekennzeichnet: zusammenhängende, Tropfenstrahl- und zerstäubte Strahlzone (vgl. **Bild 3.3**).

Der Übergangsbereich ist durch die kontinuierliche Abnahme des Axialstaudruckes und den Übergang von statischer zu dynamischer Materialbeanspruchung gekennzeichnet (Beutin 1975, Yanaida & Ohashi 1978). Im Hauptbereich bildet sich ein ausgeprägtes radiales Staudruckprofil heraus. Die radiale Staudruckverteilung weist ein der Gaußschen Glockenkurve ähnliches Profil auf. In einer $h_s = 3 h_{s,Kompakt}$ fällt der Axialstaudruck auf 35% (Yanaida & Ohashi 1976) bzw. 70% (Shavlovsky 1972) seines Ausgangswertes. Das radiale Druckprofil wechselt in Abhängigkeit von Strahllänge h_s von einer ursprünglich mehr konkaven Form zu einer zunehmend konvexen Form.

Unterschiedliche Belastungsmöglichkeiten stehen dem Anwender zur Verfügung, die er gezielt zum Abtrags- und Reinigungsvorgang einsetzen kann. Die Belastungen können durch Variation der Prozessparameter der entsprechenden Nutzenanwendung des Strahls angepasst werden.

3.2.4. Wirkmechanismen und Materialverhalten bei Strahldruckbelastung

Umfangreiche Beobachtungen der Abtragsvorgänge verschiedener Materialien führen zur Kennzeichnung von vier Formen der Wirkmechanismen bedingt durch Strahldruckbelastungen (Beutin 1975, Adler 1979).

- a. *direkte Verformung* des Materials durch die in den ersten Mikrosekunden nach dem Aufprall entstehenden Stoßdruckbelastungen, wodurch Vertiefungen und Risse eingeleitet werden.

b. *mechanische Stoßwellen*, die sich radial von der Kompressionszone der Tropfen ausgehend im Material ausbreiten und in Wechselwirkung mit bestehenden Rissen und mikrostrukturellen Eigenschaften treten.

Die dadurch bedingten Rissausweitungen und Brüche hängen von der Wellengeschwindigkeit und dem Bruchverhalten des abzutragenden Materials ab. Die Initiierung von Rissen und Brüchen kann auch beim Passieren von Stoßwellen durch Amplituden mit ausreichender Dauer, die zur Abnahme der dynamischen Bruchfestigkeit des Materials führen, erreicht werden (Thomas & Brunton 1970).

c. durch *radiales Abströmen* des Fluids („Jetting“) resultierende Schubbeanspruchungen des zu reinigenden Materials infolge der Reibung zwischen Strahl und Material, wodurch eine durch Erosion gekennzeichnete Wirkung erreicht wird.

d. *hydraulisches Eindringen und Unterhöhlen* des Materials während des Tropfenaufpralls auf poröser bzw. mit Rissen behafteter Materialoberfläche, welche zur Materialtrennung führen.

Die Trennung des durch die Druckbelastung von Mehrfachtropfenaufschlägen ausgesetzten Abtragmaterials basiert auf einer oder mehreren der obigen Wirkmechanismen (Meng et al. 1997). Dazu muss eine materialspezifische Belastungsgrenze überschritten werden (Beutin 1975, Wu & Kim 1995, Meng et al. 1997).

Nach dem Abtragsmodell von Thiruvengadam (1967) und Springer (1976) tritt der Materialabtrag aufgrund der Beanspruchung, bedingt durch eine bestimmte Anzahl von Belastungsamplituden (Tropfenaufschlägen) auf, wenn die entsprechende spezifische dynamische Belastung die Festigkeit S des beanspruchten Materials übersteigt (Shigley 1977, Meng et al. 1997, Leu et al. 1998). Danach gilt die Beziehung,

$$\lambda C_{s,sp} \psi \geq S \quad (3.4)$$

in der der Belastungskoeffizient λ , welcher abhängig von dem Tropfendurchmesser d_t , vom Verschmutzungsgrad und den Eigenschaften von Abtrags- und zu reinigenden Materialien sowie des Strahls ist, die spezifische Massenstromdichte $C_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen und die Schallgeschwindigkeit ψ im Strahl einbezogen sind.

Beim Materialabtrag muss die Adhäsion zwischen Reinigungsgut und Abtragsmaterial beachtet werden (Meng et al. 1997).

Der wirksame Mechanismus wird von dem Verhalten des abzutragenden Materials (spröde, duktil oder viskos) aufgrund der Belastung bestimmt (Milchers 2001). Das mechanische Verhalten des Materials steuert teilweise die Bedeutung der einzelnen Wirkmechanismen (Adler 1979). Bei spröden Materialien reicht es aus, wenn eine Risseinleitung durch impulsartige Stoßdruckbelastung ausgelöst wird. Die Rissausweitung kann dann mit Hilfe der Staudruckbelastung aufrecht erhalten werden. Duktile Materialien hingegen erfordern die Einzeltropfenschlagbeanspruchung, um eine Rissausbildung und –ausweitung zu erzielen (Louis & Schikorr 1982, Shikorr 1986).

Wie bereits im Abschnitt zuvor beschrieben, wirken je nach Strahlbereich unterschiedliche Anteile von zusammenhängendem Strahl und Tropfenstrahl, die entsprechend der Wirkung am Material kurze, impulsartige Stoßdruckbelastungen, kontinuierliche Staudruckbelastungen oder eine Mischung aus beiden erzeugen. Die verschiedenen Strahlbereiche ergeben je nach Zustand und Verhalten des abzutragenden Materials unterschiedliche Wirkmechanismen (**Tabelle 3.1**) und Abtragsprofile (Schikorr & Louis 1982, Wu & Kim 1995, Milchers 2001).

Mit dem Beginn des Hauptbereichs (**Abschnitt 3.2.3; Gleichung 3.4**) bewirkt der Aufprall des kompakten Tropfenstrahls auf dem Material eine wesentlich höhere Stoßdruckbelastung und dadurch eine steigende Abtragsintensität (Beutin 1975, Louis & Schikorr 1982, Kang et al. 1993, Meng et al. 1997). Die Abtragsintensität variiert u. a. nach Dauer der Materialbeanspruchung (Beutin 1975, Milchers 2001).

Tabelle 3.1 Überblick wirksamer Abtragsmechanismen beim Strahlreinigen

Mechanismus Strahlzone	Stoßdruck	Staudruck	Erosion (Abfließen)
Einzeltropfenschlag	●	○	○
Einzeltropfenschlag (kleiner Auftreffwinkel)	⊙	○	○
Zusammenhängender Strahl (großer Auftreffwinkel)	⊙	●	○
Kompakter Strahl (großer Auftreffwinkel)	●	○	○
Kompakter Strahl (kleiner Auftreffwinkel)	⊙	●	●

● Ausgeprägt wirksam, ○ Untergeordnet wirksam, ⊙ Nahezu unwirksam

Um die optimale Strahlwirkung zu erhalten, müssen Art und Intensität der spezifischen Druckbelastung des Strahls dem abzutragenden Material angepasst werden (Louis 1978). Sie können nur im Zusammenhang mit den Prozessparametern definiert werden (Milchers 2001).

3.3. Anwendungsorientierte Untersuchungen und Forschungsschwerpunkte

Der Menschheit ist die abtragende Wirkung von Wasser seit langem bekannt. In den 1930er Jahren wurden Wasserstrahlen mit relativ niedrigem p zum Reinigen in industriellen Fertigungsverfahren eingesetzt. Mit der Pumpenentwicklung war es seit den 1950er Jahren möglich, nahezu jedes abzutragende Material, welches eine niedrigere Festigkeit als der eingesetzte Wasserstrahl aufweist, unter Einsatz der Hochdruckstrahltechnologie zu reinigen (Pardey 1974, Louis 2000, Ligocki 2005). Mit der Entwicklung von Hochleistungspumpen sind die Einsatzfelder der Wasserstrahltechnologien in den letzten zwei Jahrzehnten stark erweitert worden (Louis 2000, Brandt et al. 2002). Die hohe Variabilität der Wasserstrahltech-

nologie und die Vielzahl der Prozessparameter erlauben die gezielte Anpassung der gewünschten Belastung des zu reinigenden Materials und bieten damit weitergehende Möglichkeiten der Verfahrensentwicklung (Louis 2000, Brandt 2002). Aufgrund ähnlicher Arbeitsweisen, Theorien und Wirkprinzipien sind Abhandlungen zum Abtragen oder Reinigen unterschiedlicher Materialien eng mit denen des Trennvorganges verwandt. Daher wurden insbesondere wissenschaftliche Arbeiten recherchiert, die sich mit dem Trennvorgang von Materialien im Hoch- sowie Niederdruckbereich beschäftigen.

Die Abtragsprozesse an unterschiedlichen Materialien durch hochbeschleunigte Wasserstrahlen wurden qualitativ und quantitativ analysiert von Boutin 1974, Louis 1979, Schikorr 1982, Case und Evans 1983, Conn 1992, Wu und Kim 1995, Camacho und Ortiz 1996, Krajcinovic 1996, Meng et al. 1998, Louis et al. 1999, Liu 2000, Milchers 2001. Untersuchungen zur Wirkung von Hochdruckstrahlen bei den Abtrags- und Reinigungsprozessen in Variation von Prozessparametern wurden von Mönicke 1971, Sandler 1976, Scott et al. 1981, Dansmore und Keegan 1981 und Krautter und Vetter 1990 auf standardisierten Testkörpern unter Laborbedingungen durchgeführt. Ein befriedigender theoretischer Rahmen zur Erklärung und Vorhersage der Abtragsergebnisse existiert jedoch noch nicht. Ein Hauptgrund dafür liegt in der großen Zahl der interagierenden Prozessparameter (Louis et al. 1999, Milchers 2001).

Auf der Basis von Analyseergebnissen wurden unterschiedliche Modelle erarbeitet, die den Ablauf des Abtrags- bzw. Reinigungsprozesses beschreiben und eine quantitative Vorhersage des Prozesses zulassen (Meng et al. 1997, Jain et al. 1999, Leu et al. 1998, Liu 2000, Milchers 2001). Die Nutzenanwendung der Niederdruckstrahlen wurde in der Wasserstrahlforschung nur in einigen wenigen Ausnahmen behandelt, obwohl heute der Niederdruckstrahl zum Reinigen unterschiedlicher Materialien vielfältig eingesetzt wird. Das Anwendungsgebiet umfasst sowohl klassische Reinigungsaufgaben an empfindlichen Materialien, z. B. Gemüse, als auch vermehrte Einsätze im Bereich der Lebensmittel- und der chemischen Industrie.

Prestwich (1974) konnte zeigen, dass durch höhere Strahltemperaturen der erforderliche Strahldruck gesenkt werden kann, mit dem Vorteil, das zu reinigende Material nicht zu schädigen. Kaye et al. (1995) haben die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die Reinigungswirkung des Niederdruckstrahls als Werkzeug bei der Reinigung von verschmutzten Anlagenoberflächen in der Lebensmittelindustrie untersucht.

Rose (1997) sowie Sawamura und Kanazawa (2001) haben die Strahlen einiger ausgewählter Niederdruckdüsen bezüglich ihrer Reinigungseffizienz sowie Schädigungspotentiale auf der Gemüseoberfläche untersucht. Daraus lassen sich aber keine Rückschlüsse auf die aufgabenbezogenen Anwendungs- sowie Optimierungsmöglichkeiten der Prozessparameter für neue Nutzenanwendungen der Strahlen ableiten.

Zusammenfassend können für die Forschung auf dem Gebiet der Wasserstrahltechnologie die folgenden Ziele formuliert werden:

- Anhebung der Reinigungsleistung der Strahlen durch verbesserte Kenntnisse über Verfahrensabläufe und den damit verbundenen Optimierungsmöglichkeiten der Prozessparameter und der Anlagenkomponenten
- Nachhaltige Nutzung, Recycling und Reduzierung der einzusetzenden Ressourcen, u. a. Wasser und Energie, durch optimierte Betriebsparameter, verbesserte Waschmethoden und Prozessgestaltung und somit Reduktion der Betriebskosten
- Verbreitung und Erschließung neuer Anwendungsfelder durch Anpassung an gegebene Randbedingungen

Obwohl für das Reinigen und Abtragen mit Hochdruckwasserstrahlen eine große Zahl experimenteller Studien existiert und es Erfahrungen für verschiedene Schmutzmaterialien und verschmutzte Oberflächen gibt, ist aufgrund stark voneinander abweichender Randbedingungen eine Übertragung der Reinigungsergebnisse ohne Verifizierung auf weitere Einsatzgebiete nicht möglich. Bei abzutragenden Materialien und den Reinigungsgütern ist neben den physikalischen Eigenschaften auch das mechanische Verhalten aufgrund von Inhomogenität einer großen Spannweite unterworfen.

Die Einflüsse der verschiedenen Reinigungsparameter können nur in Abhängigkeit materialspezifischer Eigenschaften des Schmutzes und der verschmutzten Oberfläche beurteilt werden (Scott et al. 1981, Krautter & Vetter 1990, Milchers 2001, Ligocki 2005).

3.4. Relevante Prozessparameter beim Strahlreinigen

In einer Studie von Louis et al. (2000) werden die gesamten Reinigungsprozesse in Trennung bei nahezu intakter Materialoberfläche und Erosion nach Überschreiten eines Grenzwertes der Bruch- bzw. Rissfestigkeit unterteilt. Anhand der Klassifikation dieser Prozesse von Schikorr und Louis (1982) können generelle Charakteristiken dieser Prozesse als Folge der gewählten Betriebsparameter und Materialien abgeleitet werden. Demnach werden Verlauf und Effektivität der Prozesse durch die Eigenschaften des Strahls und des abzutragenden Materials sowie die Hafteigenschaften zwischen den zu reinigenden und abzutragenden Materialien bestimmt. Einen zusammenfassenden Überblick über die Vielschichtigkeit der Abtragsmechanismen beim Reinwasserstrahlreinigen liefert **Bild 3.5**.

Experimentelle Abtragsbeobachtungen haben gezeigt, dass die Abtragsrate mit der Erhöhung des *Arbeitsabstandes* h_a zunächst zunimmt, bis an einem bestimmten h_a das Maximum der Abtragsrate erreicht ist. Mit weiterer Erhöhung des h_a sinkt jedoch die Abtragsrate. Die maximale Abtragsbreite $b_{s,max}$ liegt irgendwo zwischen dem Strahlaustritt und einem kritischen Arbeitsabstand $h_{a,k}$. Bei dem $h_{a,k}$ verliert der Strahl seine Fähigkeit zur Erzeugung eines ausreichenden spezifischen Aufpralldruckes, um das Schmutzmaterial abzutragen (Louis & Schikorr 1982, Kang et al. 1993, Xu & Summers 1994, Wu & Kim 1995, Meng et al. 1997). Die Variation von Reinigungsmechanismus und Effektivität in Abhängigkeit vom h_a ist durch die Strahleigenschaften und die daraus resultierenden Druckzustände während des Strahlaufpralls bestimmt. Der h_a produziert somit unterschiedliche auf die Materialoberfläche wir-

kende Strahlbereiche mit unterschiedlichen Belastungseigenschaften (Wu & Kim 1995, Meng et al. 1997).

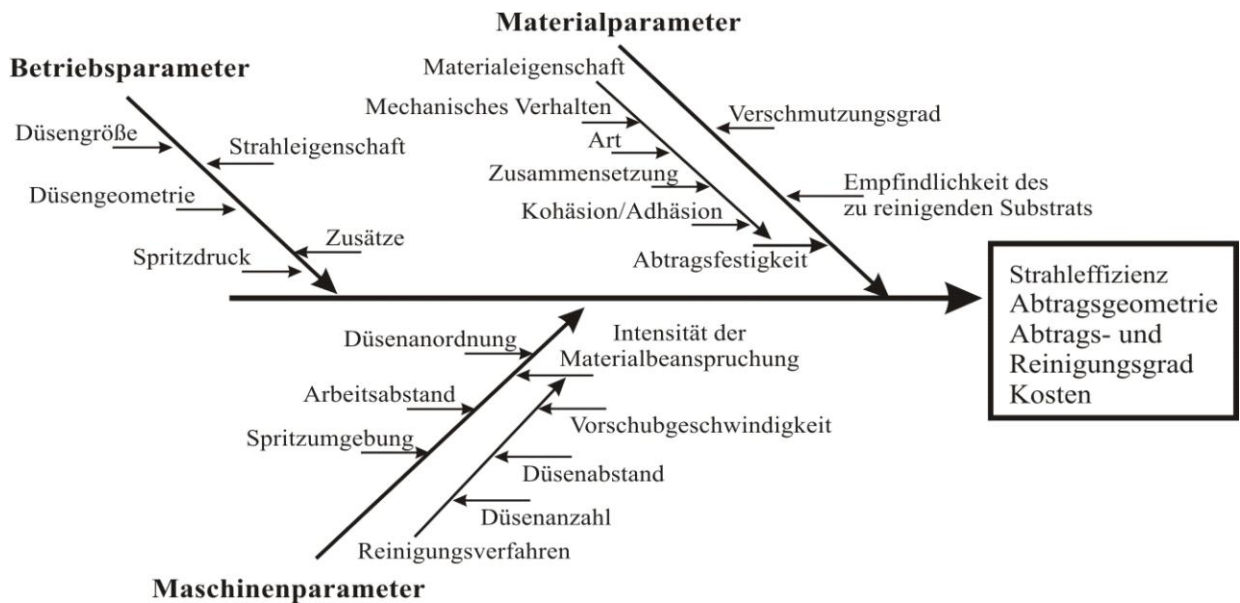


Bild 3.5 Zusammenstellung der relevanten Prozessparameter auf die Reinigungsergebnisse von Strahlen, verändert nach Brandt et al. (2001)

Aus den Untersuchungen, u. a. von Hassan 1978, ist bekannt, dass das Reinigungspotential von Strahlen nicht nur von ihrer Intensität, sondern auch von ihrem Belastungsanteil bestimmt wird. Unterschiedliche Materialien erfordern zum optimalen Abtrag Druckbelastungen mit angepassten Anteilen der Komponente Staudruck (statisch) und Stoßdruck (dynamisch). Haferkamp et al. (1984) zeigen, dass für die abzutragenden Epoxidharzschichtungen, wo die Harzschicht empfindlich auf die dynamische Belastung durch einzelne Tropfen reagiert, der h_a von 40 bis 70 cm die günstigen Belastungsvarianten (Abtragsmaximum) darstellt.

Der *Strahlaufprallwinkel* $\theta_{s,h=f(z)}$ hat Auswirkungen auf die Belastungsanteile und somit auch auf die Wirkmechanismen des Strahls (vgl. **Abschnitt 3.2.3**), da über diesen Strahlparameter die axialen und radialen Anteile der Druckbelastung variieren (Schikorr 1986, Momber 1988). Der optimale $\theta_{s,h=f(z)}$ verschiebt sich mit zunehmender Duktilität des abzutragenden Materials zu Werten kleiner als 90° zur Materialoberfläche (Schikorr 1986). Für eine glatte, harte Materialoberfläche bestimmt der axiale Anteil der Geschwindigkeit das Abtragspotential der Tropfen. Bei rauen Oberflächen oder bei Oberflächen, die sich während eines Tropfenaufpralls wesentlich verformen und bei Schmutzmaterialien mit geringer Haftung zum Substrat trägt der radiale Bestandteil bedeutsam zum Materialabtrag bei (Rieger 1970, Brunton & Rochester 1979, Schikorr 1986). Das Erreichen eines ausreichend hohen Niveaus der spezifischen Druckbelastung kann durch zwei weitere Möglichkeiten verwirklicht werden: aufgabenorientierte Einstellung des Spritzdruckes p und/oder des Düsendurchmessers d_d (**Gleichung 3.5**). Die bereitzustellende hydraulische Strahlenergie $e_{s,h=0}$ [$e_{s,h=0} = p Q$] wird durch den p und die Volumenstromrate Q des Strahls erzeugt (Schikorr 1986, Momber 1988, Krautter &

Vetter 1990). Unter Einziehung des d_d , der Strahlaustrittsgeschwindigkeit $v_{s,h=0}$ sowie unter Berücksichtigung der Strahlstruktur durch die Durchflussziffer α_s kann die Strahlleistung $e_{s,h=0}$ auch durch den Spritzdruck p und die Dichte von Wasser ρ_F in **Gleichung 3.5** ausgedrückt werden (Guo 1994, Ligocki 2005).

$$e_{s,h=0} = \pi \alpha_s d_d^2 \sqrt{p^3 / 8 \rho_F} \quad (3.5)$$

Guo (1994) fasst dabei die Koeffizienten Widerstandsbeiwert μ (vgl. **Abschnitt 3.2.1**) und Expansionszahl ε zur Berücksichtigung der Strahleinschnürung zusammen.

Meng et al. (1997) zeigen mit ihrer mathematischen Modellanalyse des Strahlreinigungsprozesses, dass der kritischer Arbeitsabstand $h_{a,k}$ linear proportional zum d_d und proportional zu $p^{0,25}$ ist. Die Effekte der dynamischen Belastungsanteile des Tropfenstrahls werden mit steigendem p zunehmend eingeschränkt (Louis 1978, Momber 1988). Mit steigendem d_d und dem höheren Q verschiebt sich die Spritzbreite $b_{s,l}$ zu größeren h_a , weil der kompakte Strahl erst später in Tropfen zerfällt. Die Reinigungswirkung kleiner Düsen lässt jedoch mit zunehmendem h_a nach, weil die spezifischen dynamischen Belastungen abnehmen (Beutin 1975, Schikorr 1986, Momber 1988).

Die spezifische Materialbelastung hängt von der Verteilung der v_t und des d_t der aufprallenden Tropfenstrahlen ab. Die Analyse der Abhängigkeit der Stoßdruckwellen und die Tropfeneigenschaften ergeben, dass die Amplitude der Belastung proportional zur v_t und unabhängig von dem d_t ist. Die Amplitudendauer und der Radius vom ersten Kontaktpunkt zwischen Tropfen und Material, bei dem die Belastungswelle die maximale Amplitude erreicht, sind jedoch proportional zur v_t und zum d_t (Milchers 2001).

Der Zusammenhang, wie im **Abschnitt 3.2.1**, in **Gleichung 3.1** und **Gleichung 3.2** erläutert, zeigt, dass der d_{32} mit Steigerung der v_r und damit der We , bedingt durch zunehmende Strahl-turbulenz und Luftreibungskräfte abnimmt. Die Unterschiede in den Tropfenvolumenverteilungen bei geringeren Entfernungen von der Düse sind jedoch relativ gering (Louis 1978, Schmidt 1980, Momber 1988, Wu & Kim 1995, Krüger 1998). Die Zerfallsanalyse im Nahbereich mittels Holographie von Wu et al. (1992) zeigt, dass sich durch Erhöhung des p und somit der Strahlaustrittsgeschwindigkeit der Anfangspunkt des Primärzerfalls in Richtung Strahlaustritt bewegt. Der d_{32} der Tropfengrößenverteilung wird mit abnehmender Entfernung der Anfangsstelle des Primärzerfalls zum Strahlaustritt kleiner. Mit Abnahme der Tropfenradien verringert sich die maximale Re der Tropfen (Spillman 1984, Sirignano 1999). Andererseits nimmt die mittlere Tropfengröße mit dem d_d und der damit verbundenen Ausdehnung des zusammenhängenden Strahlkerns zu. Die Tropfengrößenverteilung kleiner Düsen weist deutlich mehr kleine Tropfen unter ähnlichen Betriebsbedingungen auf als die größerer Düsen (Selcan & Göhlich 1982, Momber 1988, Schneider 1995, Ludewig 1998, Liu 2000).

Wiedemeier (1981) und Louis et al. (2000) haben mit ihrer Analyse des zeitlichen Abtragsverlaufs gezeigt, dass der Materialabtrag nach einer Zeit der Schädigungsakkumulation auf dem abzutragenden Material und nach der Überwindung der Kohäsion beginnt. Die Akkumulationsphase bis zur Riss- bzw. Bruchbildung dauert länger in den größeren Entfernungen zur

Strahlachse. Grund hierfür sind die abnehmende Geschwindigkeit und die spezifische Volumenflussrate des Strahls, die eine schrittweise Abtragvergrößerung erklärt (Louis et al. 1999). Die ausreichend hohe spezifische Materialbeanspruchung durch optimal ausgewählte Betriebs- und Düsenparameter führt zur Verkürzung der Akkumulationsphase und der Beanspruchungszeit des abzutragenden Materials. Dabei sind jedoch die Unterschiede in den Akkumulationszeiten der abzutragenden und zu reinigenden Materialien zu berücksichtigen, um eine effizientere Reinigung ohne Beschädigung des zu reinigenden Materials zu erzielen.

Nach Untersuchungen von Honegger (1927) ist der Materialabtrag über die *Beanspruchungszeit* nicht konstant. Anhand der Abtrag-Zeit-Kurven kann der Verlauf des Abtragprozesses für Vollmaterialien in folgenden Phasen unterteilt werden: Inkubations-, Akkumulations-, Attenuationsphase (Dämpfungsphase) und stationäre Phase (Brunton & Rochester 1979 und Wiedemeier 1981, Milchers 2001).

Bezüglich der optimalen Beanspruchungszeit für eine effiziente und schonende Abtragung wird vorgeschlagen, in der Akkumulationsphase die Abtragsrate als Funktion der Massenverluste und der Beanspruchungszeit als ein geeignetes Maß für die Materialtrennung zu verwenden (Brunton & Rochester 1979, Hoff et al. 1967, Heymann 1973).

Smith et al. (1967) geben dagegen die Abtragsrate in der stationären Phase als praktisches Maß der Materialtrennung an. Die Beanspruchungszeit mit optimaler Abtragsrate verschiebt sich mit abnehmenden d_d zu kleineren Werten (Louis 1978). Mit zunehmender *Vorschubgeschwindigkeit*, d. h. mit abnehmender Beanspruchungsdauer des abzutragenden Materials, nimmt der Materialabtrag ab (Louis 1978, Momber 1988).

Das Einsatzspektrum von Strahlen im Reinigungsprozess beruht daher auf seiner aufgabenorientierten Adaptierbarkeit durch die Anpassung der relevanten Prozessparameter, welche sich auf die Reinigungseffizienz und -qualität beziehen. Durch veränderbare Prozessparameter können die durch den Strahl an dem abzutragenden Material wirkenden Beanspruchungen dem zu reinigenden Material bzw. dem praktischen Reinigungsfall angepasst werden (Louis 1978, Schikorr 1986). Dadurch kann die Reinigungsdauer und der Wasserverbrauch wesentlich verringert werden (Schikorr 1986, Krautter & Vetter 1990).

Die Optimierung der Wasserstrahlreinigungstechnologie bei den praktischen Aufgaben, auch im Gemüsewaschprozess, ist nur durch das Vorliegen eines tieferen Verständnisses der reinigungsrelevanten Gesetzmäßigkeiten, auf der Basis der Labor- und Praxistests, möglich.

3.5. Anforderung an den Wasserstrahl für die Gemüsewäsche

Die Aufgabe der Gemüsereinigung ist es, durch den Gebrauch eines reinen Wasserstrahls unerwünschtes Schmutzmaterial (anhaftende Erde, Blätter und Wurzelreste) von der Gemüsoberfläche zu entfernen. Die Strahlwirkung im Reinigungsprozess wird grundsätzlich durch kinetische Energie, thermische Energie, Chemie und Zeit beeinflusst (Krautter und Vetter 1990, Geyer 1999).

In **Bild 3.6** sind die Parameter zusammengefasst, welche den Gemüsereinigungsprozess maßgeblich beeinflussen.

Wie im **Abschnitt 3.4** beschrieben ist, wird die Effektivität bei der Reinigung, z. B. beim Entfernen der anhaftenden Erde vom Gemüse, durch die untereinander agierenden Eigenschaften des Strahls, der anhaftenden Erde und des Gemüses bestimmt. Der Einsatz von Zusätzen und damit auch der von chemischen Reinigungsmitteln zum Gemüsewaschwasser ist jedoch nicht zulässig. Zudem ist die Anwendung von warmem Waschwasser nur auf die gemüseverarbeitende Industrie und auf die Wäsche von Kartoffeln beschränkt, da aus Gründen der Qualitätserhaltung das Frischmarktgemüse möglichst kalt gewaschen werden sollte.

Durch die optimale Einstellung der veränderbaren Betriebsparameter und durch die geeignete Ausbildung der Strahlen sollen die erforderlichen, dem Erdmaterialverhalten angepassten Beanspruchungen ohne wesentliche Beeinträchtigung des Frischgemüses erreicht werden. Da das Frischgemüse in der Regel empfindlich gegenüber der für die Reinigung notwendigen Belastung ist, bestimmen nicht nur das Verhalten der anhaftenden Erde, ihre Adhäsion, sondern auch das Verhalten des Gemüses die Intensität und die Art der Belastung.



Bild 3.6 Einflussfaktoren auf den Reinigungsprozess von Gemüse, nach Mulugeta und Geyer (2003)

Die eindeutige Zuordnung der am Gemüse anhaftenden Erde zu einem bestimmten Materialverhalten hängt von einer Vielzahl spezifischer Eigenschaften (u. a. Bodenart, Porosität, Wassergehalt) ab. Die Art und Intensität der zum Abtragen des Erdmaterials notwendigen Belastungen variieren nach dem Feuchtezustand des Erdmaterials während der Gemüsereinigung, weil in der Struktur des Erdmaterials zeitbedingte Veränderungen auftreten (Louis 1978). Neben der Bodenart hängen Verformungen und Bruchverhalten gegenüber Belastungen stark

vom Wassergehalt des Erdmaterials sowie von der Konsistenz ab. Der Konsistenzindex drückt dabei die relative Stärke des Materialzusammenhalts jeder möglichen Konsistenz aus. Sehr niedriger Wassergehalt führt z. B. bei bindigen Böden zu starker Kohäsion bzw. fester Konsistenz (Konsistenzindex $> 1,3$). Demgemäß liegt die zur Erreichung der Verformung oder des Bruches erforderliche Beanspruchung höher als bei ansteigendem Wassergehalt bzw. bei halbfester oder plastischer Konsistenz. Sandige Böden verlieren weitgehend ihre Kohäsion bei starker Austrocknung (Kretschmer 1984).

Zur Entfernung einzelner, schlecht anhaftender Partikel, z. B. Sandböden mit loser Konsistenzform (Kretschmer 1984), ist die Belastung durch radial abströmende Strahlflüssigkeit maßgebend. Wenn mikrostrukturelle Risse am anhaftenden Erdmaterial durch Verringerung des Wassergehalts (Austrocknung) vorhanden sind, genügt zur Rissaufweitung die statisch aufgebrachte Belastung in Höhe des Staudruckes p_{stau} . Das hydraulische Eindringen in die Poren, Mikro- und Makrorisse und die radial abströmende Strahlflüssigkeit trägt hier zur Erweiterung von Rissen, zur Trennung und Abtragung der herausgelösten Materialpartikel entscheidend bei.

In der halbfesten Konsistenz (Konsistenzindex = $1...1,3$) sind die Böden nur begrenzt plastisch verformbar. Sie reagieren bei Belastung durch die Bildung und Ausbreitung von Rissen und mit Bruch. Der Abtrag dieses spröden Erdmaterials erfolgt vorwiegend über das Herausbrechen von Materialpartikeln. Für die Rissinitiierung sind die Mechanismen der direkten Verformung (vgl. **Abschnitt 3.2.4**) verantwortlich, wo axiale Aufprallgeschwindigkeiten benötigt werden, die größer als die Bruchfestigkeit des anhaftenden Erdmaterials sind.

Viele Autoren (u. a. Springer 1976, Louis & Schikorr 1982, Schikorr 1986, Li et al. 1992, Kang et al. 1993) berichten, dass die Ausbreitung der mechanischen Stoßdruckwellen hauptsächlich für die Rissbildung im Abtragsprozess verantwortlich ist. Das Abtragsmaximum des spröden Materials liegt bei einem Strahlauffreffwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ von 90° vor (Brunton & Rochester 1979, Steinheil & Schmidberger 1979, Schikorr 1986).

Bindige Böden mit plastischer bzw. plastisch-weicher Konsistenz verformen sich unter der Strahlbelastung plastisch. Hinsichtlich des Wassergehalts liegt in dieser Konsistenzform das Maximum der Adhäsion dieser Böden (Konsistenzindex $\leq 0,75$). Die Adhäsion nimmt mit steigendem Tongehalt zu (Kretschmer 1984). Die Böden mit plastisch-weicher Konsistenz werden bei der Beanspruchung durch Stoßdruckbelastungen zunächst verfestigt, ihre Kohäsion steigt. Mit zunehmender Belastung beginnt die Riss- und Bruchbildung. Dieses Verhalten erklärt die Notwendigkeit einer längeren Beanspruchungszeit in der Akkumulationsphase als bei sprödem Materialverhalten (Louis 1978, Schikorr 1986).

Um den Wasserstrahl effektiv und effizient anzuwenden, ist eine spezifische dem Verhalten des Erdmaterials unter Berücksichtigung der Beschädigungsgrenze des Gemüses angepasste Strahl Druckbelastung erforderlich. Wie bei allen Nutzanwendungen des Strahls soll das Strahlergebnis der Gemüsureinigung mit einem Minimum an eingesetzter Zeit und hydraulischer Energie durch die Wahl der relevanten Düsen- und Betriebsparameter verwirklicht werden. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, soll in Anlehnung an Louis (1978), Schikorr (1986), Krüger (1998) und Milchers (2001) ein Waschwasserstrahl

- eine optimale Mikrostruktur besitzen, d. h. der Strahl soll in Tropfen mit optimaler Größen- und Geschwindigkeitsverteilung zerfallen, die zur wirksamen Direktdeformation, Amplitude der Stoßdruckwelle und Materialbeanspruchung während des Einzeltropfen-aufpralls führen.

In Abhängigkeit vom mikrostrukturellen Zustand und Verhalten des Erdmaterials erfolgt eine Rissinitiierung aufgrund der dynamischen Materialbelastung in Stoßdruckhöhe, die überproportional mit der Auftreffgeschwindigkeit der Tropfen steigt. Die messbaren mikrostrukturellen Materialveränderungen sind eine Folge der Vielzahl von aufprallenden Tropfen. Die Summe kurzer Einzelbelastungen kann eine größere Wirkung zeigen, als eine zeitlich entsprechende einmalige Beanspruchung (Louis 1978, Schikorr 1986). Die Stoßdruckwellen eines kleinen Tropfens sind weniger intensiv an der mit einem dünnen flüssigen Film bedeckten Materialoberfläche als die Wellen eines großen Tropfens mit gleicher Geschwindigkeit. Zahlreiche Abtragsanalysen zeigen, dass die Abtragsrate unabhängig von der Größe der Tropfen mit einem $d_t > 1$ mm ist und mit kleineren Größen als diese sinkt (u. a. Hobbs 1966, Hoff et al. 1967). Die Wirkung der Zahl der zur Rissinitiierung notwendigen Tropfenaufschläge verhält sich umgekehrt proportional zu den Tropfengrößen mit einem d_t von 0,4 bis 2 mm (Hancox & Brunton 1966) bzw. bis 1,6 mm (Hobbs 1966). Der Effekt der Tropfengröße auf die Dauerfestigkeit des Materials kann nicht ignoriert werden, wenn die Tropfengröße und die belastete Fläche sehr klein werden. Der Geschwindigkeitsgrenzwert, unter dem keine Materialschädigung erfolgt, ist von dem d_t abhängig. Zum Materialabtrag durch Tropfenschläge werden die Geschwindigkeiten der feinen Tropfen, deren Größenklasse nach Liu (2000) mit einem d_t bis 300 μm angegeben ist, als nicht abtragswirksam angenommen, da nach Milchers (2001) sehr kleine d_t für das Abtragsverhalten des Strahls keine große Rolle spielen.

Ein Waschwasserstrahl soll außerdem

- eine optimale Makrostruktur aufweisen, d. h. eine günstige radiale Strahlausbreitung auf der zu reinigenden Gemüseoberfläche mit einer optimalen Massenstromdichte $C_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen besitzen.

Es ist eine über eine gewisse Zeit wirkende Belastungsintensität notwendig, so dass eine sichtbare Schädigung am abzutragenden Material entsteht (Louis 1978, Momber 1988). Diese spezifische dynamische Belastung, die zur Trennung eines Materialpartikels notwendig ist, muss durch eine Zunahme an Duktilität des Materials stark vergrößert werden (Milchers 2001). Die Materialfestigkeit S wird also nach **Gleichung 3.6** mit steigender $C_{s,sp}$ (**Gleichung 3.7**) geringer.

Die Anpassung der Beanspruchungszeit, die durch die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit bestimmt wird, muss den zeitlichen Abtragverlauf des Erdmaterials und die Beschädigungsgrenze des Gemüses berücksichtigen. Nach der Reinigungsaufgabe, entsprechend der Wahl des Druckes p , Düsentyps, Düsendurchmessers d_d und Arbeitsabstandes h_a , muss die Dauer der Akkumulationsphase bei der Strahlbelastung (vgl. **Abschnitt 3.4**) innerhalb der für die Kombination der Schmutz- und Gemüseeigenschaften geltenden Belastungsgrenzwerte angepasst werden (Louis 1978).

4. Material und Methode

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden neben der Literatur die wesentlichen, auf dem Markt verfügbaren sowie gebräuchlichen Reinigungseinrichtungen für die Gemüswäsche als Grundlage für die experimentellen und praktischen Untersuchungen analysiert, deren relevante Anlagenkomponenten und eingesetzte Reinigungsverfahren vorgestellt und beschrieben. Anschließend wurde für die experimentellen Untersuchungen zur Klärung des Strahlpotentials beim Reinigen gartenbaulicher Produkte ein Versuchsstand und –verfahren entwickelt, die es erlaubten, vergleichbare und reproduzierbare Messungen durchzuführen.

Außerdem wurden die Untersuchungen über die Empfindlichkeit ausgewählter Frischgemüse gegenüber hydromechanischen Belastungen durchgeführt.

4.1. Strahlreinigen von Gemüse mittels Niederdruckdüsen

Beim Materialabtrag während des Gemüserreinigungsprozesses ist eine Trennung der anhaftenden Schmutzschicht (Erde) durch eine materialspezifische Belastung erforderlich, um die Adhäsionskraft zwischen Erdmaterial und Gemüseoberfläche zu überwinden. Weiterhin bedarf es einer ausreichenden spezifischen Volumenstromrate zum Abspülen bzw. zum Abtransport der abgetrennten Materialpartikel (Beutin 1975, Louis 1978, Geyer 1999).

Besondere Probleme treten bei der Strahlanwendung zur Gemüserreinigung auf, wenn das Frischmarktgemüse der zur Trennung des anhaftenden Erdmaterials bzw. zur Überwindung der Adhäsion notwendigen Beanspruchung nicht widersteht. Der Aufprall einer hochbeschleunigten Flüssigkeitsmasse kann je nach Verhalten und Zustand des Gemüses qualitätsmindernde Beschädigungen seiner Oberfläche bzw. seines Gewebes verursachen.

4.1.1. Art und Ausführung der Düsenwaschmaschinen

Da diese Reinigungstechnologie auf die mechanische Reinigung verzichtet, werden vorwiegend Blatt-, Sprossgemüse (Salate, Porree, Spargel) und Bundgemüse mit Laub (Möhren, Rettich, Radies, Sellerie) mit Düsen gereinigt. Je nach Art und Verschmutzungsgrad des zu reinigenden Gemüses werden Waschmaschinen eingesetzt, deren Waschbereiche/-tunnel, wie die technischen Daten der dargestellten Maschinen zeigen, mit unterschiedlichen Abmessungen sowie Funktionsweisen zur Anwendung des reinen Wasserstrahls bzw. der Düsen unter Niederdruck versehen sind. Der Abtrags- und Reinigungsvorgang beruht entsprechend der in **Abschnitt 3.1** vorgestellten Definition zum Reinigen auf Auflösen des abzutragenden Erdmaterials infolge von ausreichend hoher spezifischer Belastungsintensität durch den Strahl.

In *stationären* Reinigungsmaschinen wird die Wäsche der Blatt- sowie Wurzelgemüse mit Band- (*Durchlaufverfahren*) oder Rotorwäscher (*Rotationsverfahren*) in einer Aufbereitungshalle durchgeführt. Beim *Durchlaufverfahren* wird das Gemüse auf ein endloses Förderband gelegt, bei dem es beim Passieren des Waschtunnels von allen Richtungen aus Düsen bespritzt wird. Der Spargel wird im Waschtunnel (**Bild 4.1**) durch Strahlen aus den ober- und unterhalb des Förderbandes angeordneten Düsen bespritzt. Für eine gründliche Reinigung wird der Spargel beim Waschen gedreht. Beim *Rotationsverfahren* wird das Gemüse auf einem runden Rotorgittertisch zwischen den über und unter dem Tisch angebrachten Wasch-

düsen hindurchgeführt (**Bild 4.2**). Kennzeichnend für dieses Verfahren ist, dass das Gemüse den Düsenbereich mehrmals durchlaufen kann, bis die gewünschte Reinigungsqualität erzielt ist. Bei den *mobilen* Reinigungsmaschinen wird die Wäsche und die Verpackung des Frischmarktgemüses, insbesondere Kopfsalat aber auch Bundmöhren, direkt nach der Ernte in einem Arbeitsschritt auf dem Feld erledigt (**Bild 4.3** und **Bild 4.4**). Das Frischgemüse verlässt das Feld marktfertig. Bei der Verlagerung der arbeitsaufwendigen Aufbereitungs- und Verpackungsvorgänge auf mobile Einheiten steht neben der Gewährleistung der hohen Qualitätsanforderungen des Frischgemüsemarktes die Reduzierung der Betriebsmittel (Wasser und Antriebsleistung) und Arbeitskosten im Vordergrund.



Konstruktive & technische Daten

Tunnellänge:	1 m
Tunnelbreite:	0,5 m
Düsentyp:	Flachstrahl (E2)
Düsenanzahl:	30
Düsenabstand:	15 cm
p :	3,5 bar
h_a :	18 - 20 cm
Wasserverbrauch:	6,3 m ³ h ⁻¹
Bandgeschwindigkeit:	11 cm s ⁻¹
Max. Verweilzeit:	10 s

Bild 4.1 Düsenwaschmaschinen für Bleichspargel von Fa. HEPRO (Versuchsanlage)



Konstruktive & technische Daten

Tunnellänge:	1 m
Düsentyp:	Flachstrahl; $\theta_{s,h=0} = 45^\circ$ ($Q = 7,72 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$)
Düsenanzahl:	20
Düsenabstand:	15 cm
p :	2,5 ... 3 bar
h_a :	20 - 25 cm
Wasserverbrauch:	9 m ³ h ⁻¹
Bandgeschwindigkeit:	14 cm s ⁻¹
Max. Verweilzeit:	7 s

Bild 4.2 Rotorwäscher u. a. für Sellerie und Porree (Fa. Hornung)

Die Bereitstellung ausreichender Frischwassermengen in den mobilen Wasserbehältern stellt jedoch ein Problem dar. Aus ökonomischen und maschinenbaulichen Gründen ist die Durchführung der Reinigung mit möglichst wenig Frischwasser notwendig, um u. a. die zu transportierende Wassermenge und das daraus resultierende Gesamtgewicht der Maschine zu minimieren. Dabei spielt auch die Verringerung der aus dem Maschinengewicht entstehenden Bodenverdichtung während der Feldreinigung eine wichtige Rolle.

Für eine verbesserte Reinigung von Gemüse, insbesondere von Wurzel- und Sprossgemüse (z.B. Sellerie, Spargel), werden auch Düsenreinigungsmaschinen in Kombination mit Bürsten angeboten. Für die Wäsche von Wurzelgemüse, wie Möhren, sind außerdem Trommel-

waschmaschinen mit integrierten Waschdüsen im Einsatz. Entsprechend der konstruktiven Parameter und Betriebsparameter sorgen die Düsen neben der Waschwasserzufuhr auch für die reinigende Strahlwirkung.



Konstruktive & technische Daten

Tunnellänge:	1,1 m
Tunnelbreite:	0,5 m
Düsenart:	Flachstrahl (E1)
Düsenanzahl:	12 - 22
Düsenabstand:	20 - 35 cm
p :	3 - 3,5 bar
h_a :	15...20 cm
Wasserverbrauch:	0,6 - 1 m ³ h ⁻¹
Bandgeschwindigkeit:	10 - 14 cm s ⁻¹
Max. Verweilzeit:	11 s

Bild 4.3 Feldverpackung von Kopfsalat mit Hilfe des mobilen Düsenwäschers (Fa. Hagenlocher)



Konstruktive & technische Daten

Tunnellänge:	1,8 m
Tunnelbreite:	0,7 m
Düsentyp:	Flachstrahl; $\theta_{s,h=0} = 120^\circ$ ($Q = 1,55 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$) Vollkegel; $\theta_{s,h=0} = 120^\circ$ ($Q = 3,15 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$)
Düsenanzahl:	30...40
Düsenabstand:	35 cm
p :	3 - 3,5 bar
h_a :	20 - 25 cm
Wasserverbrauch:	2,8 - 5 m ³ h ⁻¹
Vorschubgeschwindigkeit:	13 - 20 cm s ⁻¹
Max. Verweilzeit:	14 s

Bild 4.4 Prototyp des mobilen Düsenwäschers von Fa. Hagenlocher (Versuchsanlage)

4.1.2. Komponente der Reinigungsanlage

Beim Wasserstrahlreinigen von Gemüse handelt es sich um ein Verfahren, bei dem potentielle Energie unter niedrigen Drücken bis 7,0 bar in den Düsen in kinetische Energie mit Strahlgeschwindigkeiten bis 35 m s⁻¹ umgewandelt und beim Aufprallen auf das Erdmaterial in Abtragsenergie umgesetzt wird.

Resultierend aus dieser Funktionsweise kann ein Strahlreinigungssystem in die Hauptkomponenten der Druckerzeugung (Pumpe), der Druckleitung, der Strahlbildung (Druckdüsen), des Waschwasser- und Fördersystems zerlegt werden.

Druckerzeugung:

Bei Strahlreinigungsanlagen für Gemüse werden Plunger- sowie Kolbenpumpen mit einer Leistung bis zu $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei einem Spritzdruck p bis 5,0 bar eingesetzt. Die Einstellung des p , die Anzahl und Größe der eingesetzten Spritzdüsen und damit die maximale Volumenstromrate Q richtet sich nach Empfindlichkeit und Verschmutzungsgrad des Gemüses.

Um die Frischwassermenge für die Gemüsewäsche zu reduzieren, werden zunehmend Düsenwaschmaschinen mit Wasseraufbereitungsverfahren eingesetzt, die mit einer Pumpenleistung bei Schmutzwasser bis zu $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ mit einem p von 5,0 bis 7,0 bar angeboten werden. In die Waschlinie dieser Maschinen ist ein Sedimentationsbecken mit Sieb integriert, mit dem eine Kreislaufführung des Waschwassers, d. h. eine Wiederverwendung des Waschwassers u. a. nach Abtrennung der absetzbaren Schmutzpartikel, ermöglicht wird. Somit wird Trinkwasser vorrangig nur in der Nachwäsche zum Abspülen bzw. Ersetzen des auf dem Gemüse haftenden Wassers verwendet.

Bei der Optimierung des Trinkwasserverbrauchs in der Nachwäsche ist entsprechend der Gemüseart und Ausbringleistung die zwischen und auf den Blättern zurückbleibende Waschwassermenge zu berücksichtigen. Für eine qualitätsgerechte Nachwäsche ist eine gemüsespezifische Mindestwassermenge notwendig, die z.B. für Blattgemüse bei mehr als 1 m^3 pro Tonne liegt, um das haftende Schmutzwasser aus der Hauptwäsche gegen Frischwasser auszutauschen. Die Frischwasserzufuhr über die Nachwäsche muss daher eine Absenkung des Verschmutzungsgrades des stark organisch belasteten Kreislaufwassers sowie eine Ergänzung der durch das Gemüse ausgetragenen Wassermenge gewährleisten (Geyer 1996, 1997).

Strahlbildung:

Neben der Druckbereitstellung stellt die Strahlbildung den wichtigsten Teil eines Waschbereiches der Waschmaschinen von Gemüse dar. Die Strahlausbildung erfolgt mit Hilfe von Spritzdüsen, die an Düsenstangen vorwiegend zweireihig ober- und unterhalb sowie einreihig seitlich des Förderbandes angeordnet sind. Die reinen Wasserstrahlen verlassen als kontinuierliche Freistrahlen die Düsen. Die Düsensätze weisen Unterschiede in Strahlformen, Größe (Düsendurchmesser d_d bis 3 mm), Anzahl, Winkel und Abständen auf. Im Einsatz sind Düsen aus unterschiedlichen Materialien wie Messing, Keramik und Edelstahl.

Hochleistungspumpen mit einem hohen Umwälzvolumen und Düsen mit größeren d_d werden zunehmend zur Steigerung der Reinigungseffizienz bzw. Vermeidung der Düsenverstopfung bei der Beschickung der Waschdüsen mit Kreislaufwasser implementiert. Aufgrund der zu bildenden Strahlkonvergenz und der sich daraus ergebenden spezifischen Belastung der Aufprallfläche kommen vorwiegend Flachstrahldüsen mit einem Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$ zwischen 60° und 120° bei der Haupt- sowie Nachwäsche zur Anwendung. Vollkegeldüsen sind vereinzelt in Waschmaschinen für die Nachwäsche leicht verschmutzter und empfindlicher Gemüsearten (Kopfsalate) anzutreffen. Je nach Größe des Waschbereichs variiert die Anzahl der eingesetzten Düsen bei der Hauptwäsche bis 40 und Nachwäsche bis 12 Düsen.

Die Geschwindigkeit des Förderbandes ist entsprechend des Verschmutzungsgrades des Gemüses variabel verstellbar und liegt bei $0,1$ bis $0,4 \text{ m s}^{-1}$, was je nach Tunnellänge zu Ver-

weilzeiten t_v des Gemüses im Waschbereich von 10 bis 25 s führt. Je nach den o.g. konstruktiven und betrieblichen Parametern kommt es zur unterschiedlichen spezifischen Belastungsintensität der Gemüseoberfläche durch den Strahl.

Neben den kontinuierlichen Wasserstrahlen werden für eine Gemüsereinigung vereinzelt pulsierende Strahlen bei einem Spritzdruck p von ca. 3,5 bar angeboten.

4.2. Versuchsmaterial und –aufbau im Labor

Für die experimentellen Strahluntersuchungen bei Niederdruckdüsen wurde der in **Bild 4.5** dargestellte Versuchsstand im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) aufgebaut.



- a. Düsenhalter
- b. Düse
- c. Drehbarer Gittertisch
- d. Vorlagebehälter

Bild 4.5 Versuchsstand zur Wasserstrahluntersuchung

Der Versuchstand enthielt u. a. eine bewegliche Düsenhalterung (a), die in vertikaler und horizontaler Richtung manuell ausgerichtet werden kann. Diese Vorrichtung ermöglichte variable Arbeitsabstände h_a der Versuchsdüsen (b), die senkrecht zum drehbaren Gittertisch (c) angeordnet waren. Reine Wasserstrahlen wurden aus dem Vorlagebehälter (d), der gleichzeitig als Auffangvorrichtung diente, mit Hilfe einer Kolbenpumpe über Durchfluss- und Druckmessgeräte der Düse zugeführt. Die Strahlen aus den Versuchsdüsen treten in die umgebende Luft bei atmosphärischem Druck aus und trafen dann in einem h_a auf die Aufprallfläche über dem Gittertisch. Auf dem Gittertisch wurden Messapparate fixiert, mit denen unterschiedliche Messungen zur Charakterisierung der Strahlen vollzogen wurden.

Des Weiteren wurden die Messeinrichtungen des Düsenherstellers, Lechler GmbH (Metzingen, Deutschland) zur Erfassung verschiedener Strahlstrukturparameter herangezogen.

Bei variierenden Düsen- und Betriebsparametern wurde die Charakterisierung der Strahlausbildung und der Strahlwirkung beim Aufprall auf unterschiedlichen Flächen vorgenommen, um den Effekt variierender Prozessparameter auf die Strahleffizienz während der Abtrags- und Reinigungsprozesse zu bewerten.

4.2.1 Versuchsparameter unter Laborbedingungen

Ausgehend von der Vielzahl und Komplexität der Abtragsprozesse ergeben sich die zu variierenden Prozessparameter: der Spritzdruck p , der Arbeitsabstand h_a , der Öffnungsdurchmesser d_d und der Düsentyp. Als Versuchsduisen der Untersuchung sind sieben Niederdruckdüsen ausgewählt worden, die sich u. a. in ihren Konfigurationen unterscheiden. Die gewählten Einstoffdüsen repräsentieren die ganze Bandbreite von landwirtschaftlichen und industriellen Düsen, die in den gegenwärtig verfügbaren Gemüsewaschmaschinen anzutreffen sind bzw. für die Wäsche geeignet erschienen.

Die Geometrie- und Durchflussdaten der Düsen sind in **Tabelle 4.1** angegeben.

Tabelle 4.1 Kennwerte der Versuchsduisen (Düsensdurchmesser d_d , Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$, Volumenstromrate Q und Spritzdruck p)

Düse (Lechler GmbH)	Bezeichnung	d_d , mm	$\theta_{s,h=0}$, Grad	Q abhängig vom p , $l\text{ min}^{-1}$		
				3 bar	5 bar	8 bar
Flachstrahldüse:						
Agrardüse:						
LU 90-04	E1	0,75	90	1,5	2,1	2,6
Industriedüse:						
632.566	E2	1,1	90	—	4,1	—
632.646	E3	1,3	90	—	6,2	—
632.726	E4	1,7	90	7,2	9,9	12,6
632.724	E5	2,1	60	—	9,9	—
Vollkegeldüse:						
Industriedüse:						
460.644	E6	2,4	60	—	6,1	—
460.686	E7	2,6	90	—	6,6	—
460.606	E8	2,1	90	—	4,6	—

Tabelle 4.2 Versuchsbedingungen (u. a. Arbeitsabstand h_a)

	Parameter	Wert
Wasserstrahl	p , (bar)	3; 5; 8
	Düsentyp:	Flachstrahl (E1, E2, E3, E4, E5), Vollkegel (E6, E7, E8)
	$\theta_{s,h=0}$, (Grad)	60; 90
	d_d , (mm)	0,8; 1,6; 2,1
	h_a , (cm)	10; 20
	Anordnung (Grad)	90

Die Versuche zur Erfassung der Druckbelastung wurden mit Hilfe stationärer Wasserstrahlen (Dichte ρ_F : 999,8 kg m⁻³, kinematische Viskosität ν : 1,78 × 10⁻⁶ m² s⁻¹) unter vordefinierten Spritzbedingungen durchgeführt. Sie erfolgten ausschließlich durch stationäre Anordnung des zu belastenden Materials, das bei exakt definierter Belastungsdauer den Strahlen ausgesetzt wurde. Die Versuchsduise war bei allen Versuchen senkrecht zu den Materialien ausgerichtet.

Tabelle 4.2 fasst die Versuchsbedingungen zusammen, die bei der Untersuchung betrachtet wurden. In einzelnen Versuchsreihen mit mehreren Messreihen wurden jeweils ausgewählte Einzelparameter im Rahmen des Variationsbereichs variiert, wohingegen die anderen Variablen konstant gehalten wurden, um fundierte Aussagen über funktionelle Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern beim Materialabtrag / -reinigen treffen zu können. Alle Versuche wurden unter definierten Spritzbedingungen bei Raumtemperatur (20°C – 24°C) und atmosphärischem Luftdruck (0,1MPa) durchgeführt.

4.2.2. Versuchsdurchführung

4.2.2.1. Bestimmung der funktionellen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern

Ziel der Untersuchung war es, den Zusammenhang zwischen Strahlausbildung und Strahleffektivität im Abtrags- / Reinigungsprozess im Niederdruckbereich zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde ein standardisiertes Prüfverfahren erarbeitet.

Die Strahleigenschaften als Funktion der zu variierenden Prozessparameter wurden mittels verschiedener Messtechniken charakterisiert.

Die Messergebnisse ermöglichen einen Vergleich zwischen den Strahlen und lassen eine Bewertung hinsichtlich der Strahleffizienz beim Materialabtrag zu. Bei allen Messungen der gleichen Versuchsreihe wurden Mittelwertvergleiche durchgeführt und die Standardabweichung SD als Maß für die Streuung in den jeweiligen Abbildungen angegeben.

4.2.2.1.1. Strahlausbildung und –geometrie

Die Verteilung des Flüssigkeitsvolumens und die Verteilungsbreiten wurden durch Auffangen des aus der Düse austretenden Strahls mittels einer Reihe horizontal nebeneinander angeordneten Messröhrchen ($\varnothing 16$ mm) in festgelegter Strahllänge h_s unterhalb des Strahlaustritts über eine festgelegte Messzeit (ca. 10 s) automatisch erfasst (**Bild 4.6**).



Messansicht:

Spritzbreite:	$b_{s,1}$
Messrohrdurchmesser:	16 mm
Gesamtbreite:	80 cm

Bild 4.6 Konventionelle Messmethode der Strahlverteilung (Foto: Lechler GmbH)

Die Messungen der räumlichen Strahlverteilung geben Auskunft über das Spritzverhalten der Düsen bei Variation der Betriebsparameter. Bei der Ermittlung der Strahlgeometrie aus den Verteilungsbreiten, d. h. Spritzbreite $b_{s,1}$ und Spritztiefe $b_{s,2}$ und dem daraus resultierenden düsen- und arbeitsabstandspezifischen Strahlwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ werden Füllhöhen in den Messröhrchen von weniger als 5 mm vernachlässigt. Die Messgenauigkeit liegt dabei bei ± 1 %. Beispielsweise Wulf (1986) legt den Strahlrand an der Stelle fest, wo der Strahldruck noch

5% des Maximalwertes beträgt, während Yanaida und Ohashi (1980) sowie Werner (1991) den Ort messbarer Tropfenschlagsignale als Strahlrand ansehen.

Der Strahlrand repräsentiert nach Astachow et al. (1996) die radiale Entfernung von der Strahlachse, wo die Werte der spezifischen Massenstromdichte $C_{s,sp,h=f(z)}$ auf unter 1% der maximalen $C_{s,sp}$ über den Strahlquerschnitt fallen.

Schwerpunktmäßig stand die Ermittlung der spezifischen Volumenstromdichte $V_{s,sp,h=f(z)}$ des Wasserstrahls bei Variation der Einflussparameter, wie Düsentyp, d_d , Druck p und Arbeitsabstand h_a , im Vordergrund. Aus den Füllhöhendaten über die Spritzbreite $b_{s,1}$ und -tiefe $b_{s,2}$ wurden die prozentualen Volumenanteile der 201 mm² großen Teilbereiche (Öffnungsfläche der Messröhrchen) über den Querschnitt der Strahlfläche A_s ermittelt. Bei der Ermittlung der Verteilung der $V_{s,sp,h=f(z)}$ wurde aufgrund der geringen Datenauflösung eine gleichmäßige Strahlverteilung über die Auffangfläche eines Röhrchens von 201 mm² angenommen.

Die Informationen wurden als Blattdiagramm aufbereitet, in dem der o.g. Strahlparameter für die einzelnen Teilbereiche der gesamten Strahlfläche $A_{s,h=f(z)}$ dargestellt ist.

Parallel zur Erfassung der Flüssigkeitsverteilung bzw. Geometrie der Strahlen wurden Streulichtmessungen mittels Phasen-Doppler-Partikel-Analysator PDPA durch Fa. Lechler vorgenommen. Damit sollte eine bessere Zuordnung der lokalen PDPA-Messergebnisse zur gesamten Strahlausbreitung erreicht werden.

4.2.2.1.2. Verteilung der Größe und Geschwindigkeit der Tropfen

Messprinzip und -durchführung

Der Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDPA) wurde zur Quantifizierung der Strahldynamik in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebs- und Düsenparameter eingesetzt. Dabei wurde auf die Auslegung und Dimensionierung der messtechnisch relevanten Einstellparameter des am Messstand der Fa. Lechler aufgebauten PDPA-Systems zurückgegriffen.

In **Bild 4.7** ist der Messaufbau des verwendeten Phasen-Doppler-Partikel-Analysators (PDPA) schematisch skizziert.

Durch die Anpassung der geometrischen Verhältnisse der optischen Anordnung wurden die Empfindlichkeit und die Messbereiche des PDPA entsprechend der Tropfengrößenspektren der untersuchten Strahlen verändert. Bei diesem Messsystem werden drei Photodetektoren verwendet, die eine gute Messgenauigkeit und Empfindlichkeit gegenüber einem breiten dynamischen Tropfengrößensbereich (Messbereich der Tropfengröße: 1:35) anbieten. Es können bis zu $5 \cdot 10^4$ Tropfen pro Sekunde und Tropfengeschwindigkeit $v_t = 200 \text{ m s}^{-1}$ vermessen werden. Die in einem bekannten Abstand entfernt liegenden Photodetektoren empfangen gleiche Signalfrequenz, jedoch zeitlich zueinander verschobene, unterschiedliche Phasen beim Durchfliegen eines Tropfens durch die Messfläche, da sie relativ zum Tropfen unterschiedlich positioniert sind. Die Signalfrequenz ist direkt proportional der Tropfengeschwindigkeit v_t . Aus der gemessenen Phasenverschiebung ist der Tropfendurchmesser d_t zu berechnen. Die beiden Größen sind zueinander direkt proportional.

Details des Messprinzips, des Verfahrens, sowie der möglichen Messprobleme des PDPA

sind in den Arbeiten von Ruck (1990), Ludewig (1998) und Tropea (1999) zu finden.

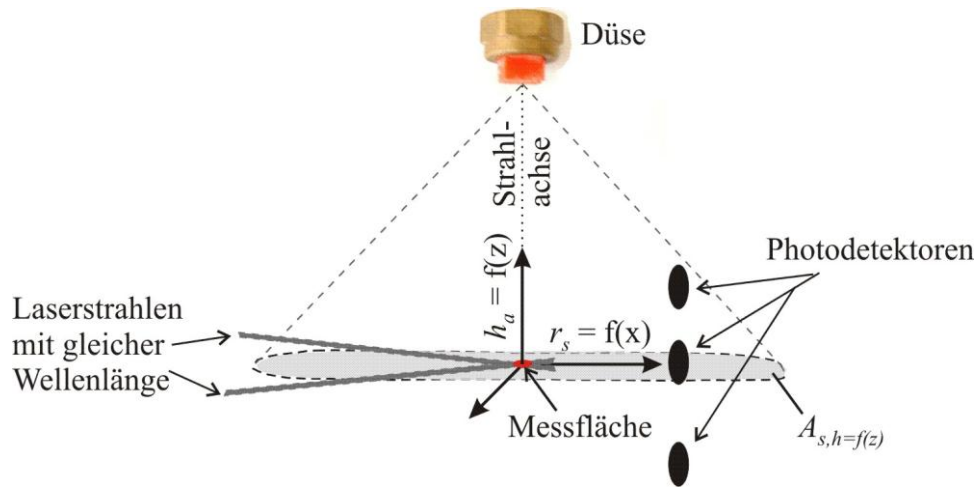


Bild 4.7 Schematische Darstellung des Messaufbaus des angewendeten Messsystems, Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDPA)

Die räumliche Variabilität der Mikrostruktur der Strahlen fand durch die Erfassung von mehreren lokalen Tropfenproben in der jeweiligen Messebene (konstante h_s zur Düse) Berücksichtigung. Dies wurde durch das radiale Verschieben der Schnittfläche der Laserstrahlen (Messfläche) von ca. $1,5 \text{ mm}^2$ (Lipthal 2009) jeweils in Schritten von 35 bis 40 mm erreicht.

Der Algorithmus im Signalprozessor, über den die Signalfrequenz ermittelt wird, beruht u. a. auf Anwendung von Korrelationsfunktionen und Korrekturalgorithmen, die eine Umrechnung der Signalamplituden in Tropfengrößen bzw. eine Korrektur der Verteilungen zum Ausgleich der Einflüsse von Messfehlern gestattet.

Die Grundinformation zur Auswertung bildet die über die Messdauer von 60 Sekunden an den jeweiligen Messflächen ermittelte Tropfenanzahl für diskrete Größenklassen. So wurden Messungen des Größenspektrums, der mittleren Volumen- $V_{s,sp,h=f(z)}$ und Massenstromdichte $C_{s,sp,h=f(z)}$ und der senkrechten Geschwindigkeitskomponente der Tropfenstrahlen bei Variation der Einflussparameter, wie Düsentyp, d_d , p und h_s , durchgeführt.

Die Volumen- $V_{s,sp,h=f(z)}$ und die Massenstromdichte $C_{s,sp,h=f(z)}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen in Abhängigkeit der Volumenstromrate Q als eine Funktion des p und d_d drücken die Summen der spezifischen Volumen- bzw. Massenstromdichte aller wirksamen Tropfengrößen $d_t > 300 \text{ }\mu\text{m}$ für die jeweilige Strahlfläche A_s aus. Die Mittelwerte der Strahlstrukturparameter (Tropfengrößen- d_t und –geschwindigkeitsverteilung v_t) der Strahlflächen sind dabei flächengewichtet aus mehreren Messungen an verschiedenen Messflächen im Strahl (r_s , h_s) ermittelt worden.

Im Ergebnis lagen tabellarische Auflistungen der Histogramme mit den Mittelwerten der jeweiligen Tropfengrößenklassen und den zugehörigen v_t in Abhängigkeit von der Variation der Spritzbedingungen vor. Aus diesen lokal gemessenen durchmesserbezogenen Verteilungen wurden die globalen mittleren Kenngrößen der Verteilungen, u. a. d_{32} errechnet.

Mit den ermittelten Größen- und Geschwindigkeitsspektren der Tropfenstrahlen wurde eine

energetische Betrachtung der einzelnen Tropfengrößenklassen vorgenommen.

In dem Zusammenhang wurde die mittlere $C_{s,sp,h=f(z)}$ der wirksamen Tropfen entsprechend des **Abschnitts 3.5** nach Subtraktion der kleinen Tropfen ($d_t < 300 \mu\text{m}$) ermittelt.

Die Einbeziehung der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$ ($\sum_{n \geq 1} (I_{t,h=f(z)})_n$) als Summe der

Impulspotentiale aller Tropfengrößenklassen pro Flächen- und Zeiteinheit in die Bewertung der Strahlen erfolgte durch die Bestimmung des mittleren Impulspotenzials $I_{t,h=f(z)}$ der einzelnen Tropfengrößenklasse mit:

$$I_t = m_t v_t \sin \theta_{s,h=f(z)} \quad (4.1)$$

Ansätze zur statistischen Absicherung der PDPA-Messungen

Ein gewisser Zufälligkeitsgrad der Strahlbildung kann die Zuverlässigkeit der Messergebnisse beeinflussen. Die Anzahl der Tropfen und die mittleren Werte der Tropfengrößenverteilung in lokalen Messflächen des Strahls schwanken in bestimmten Grenzen von Strahl zu Strahl. Bei der Betrachtung des Toleranzbereichs der Pumpe und der Messgenauigkeit betragen unter identischen Spritzbedingungen die Abweichungen zwischen den Ergebnissen ca. ± 5 bis $\pm 10\%$ (Lipthal 2002). Ludewig (1998) ermittelte mit seinen Vergleichsmessungen eine Abweichung der Einzelergebnisse von -6 bis $+8\%$, bezogen auf die Mittelwerte aller Messergebnisse.

Entsprechend der Größe der Messfläche kann es bei Streulichtmessungen in Bereichen mit hoher Tropfenkonzentration zur Überlappung von Streusignalen kommen. Außerdem ist die Extinktion, d. h. die Abschwächung des Beleuchtungs- und Streulichts vor bzw. hinter der Messfläche, eine Funktion der Konzentrationsverteilung, die wiederum abhängig von den Koordinaten der Messposition im Strahl (r_s , h_s) ist. Die Konzentration ist eine Funktion der Spritzbedingungen und nimmt vom Strahlrand zum Strahlkern zu. Im Strahlkern kann daher eine zu hohe gemessene Anzahl an kleinen Tropfen ermittelt werden. Somit muss die Tropfengrößenverteilung zu größeren Durchmessern hin angehoben werden. Maßgeblich wird die Messgenauigkeit durch die Genauigkeit der Kalibrierung bestimmt. Für die Abschätzung der Fehlereinflüsse auf die Tropfengrößenverteilungen wurden rechnerische Vergleichsuntersuchungen vorgenommen.

Mit Hilfe des Korrelationsansatzes nach **Gleichung 4.2** von Dombrowski und Munday (1968) wurden Mittelwerte der Tropfengrößenverteilungen von ausgewählten Strahlen generiert und mit den Werten der Messungen verglichen.

Außerdem muss die Gesamtsumme der Massenstromdichte $C_{s,sp,h=f(z)}$ des Tropfenstrahls (**Gleichung 3.6**) über jede Strahlfläche $A_{s,h=f(z)}$ der Summe der $C_{s,sp,h=0}$ des Strahls am Düsenausgang entsprechen. Demzufolge gilt die **Gleichung 4.2** entsprechend der experimentellen Beobachtungen von Abramovich 1963 (in Meng et al. 1998).

$$C_{s,sp,h=f(z)} = 5,62 C_{s,sp,h=0} (d_d^2 / r_{st}^2) \quad (4.2)$$

Die $C_{s,sp,h=f(z)}$ am Strahlkern lässt sich demnach aus der $C_{s,sp,h=0}$ des Strahls am Düsenausgang, dem Düsendurchmesser d_d und dem Radius des Tropfenstrahls r_{st} (vgl. **Bild 3.3**) bestimmen.

4.2.2.1.3. Verteilung des maximalen Strahldruckes

Messdurchführung

Um ein besseres Verständnis des Strahlaufpralleffektes auf einem Material zu gewinnen, ist es erstrebenswert, die genaue zeitabhängige Druckverteilung innerhalb der Aufprallfläche oder mindestens die genauen Werte des kurzfristig auftretenden Maximaldruckes zu kennen (Heymann 1969).

Mit Hilfe des Foliendrucksensors (Typ 5051, Tekscan, Inc., Boston, USA) wurde die Verteilung der Aufprallkräfte innerhalb der Strahlaufreffflächen (**Bild 4.8a**) in hoher räumlicher Auflösung erfasst (Mulugeta et al. 2002, 2005). Demnach wird in der vorliegenden Arbeit die Verteilung der gemessenen pixelflächenbezogenen Kraftwerte F_{max} als Verteilung der Strahl- bzw. Maximalaufpralldrücke P_{max} angenommen.

Die innere Sensorfläche hat eine Gesamtmessfläche von $5,6 \times 5,6$ cm und besteht aus einem leitfähigen Raster von 44 Reihen und 44 Spalten mit einem Abstand von 1,27 mm. Der Sensor nimmt punktuelle Drucksignale auf jeder der $1,27 \times 1,27$ mm großen Pixelfläche auf. Das Digitalisieren der Signaldaten erfolgte durch einen Analog-Digital-Konverter auf einer 8-bit-Skala bis maximal 0,05 MPa (7psi) mit einer Auflösung von ca. 0,2 kPa. Die Einzelpixel wurden 100-mal in der Sekunde abgetastet. Zur weitergehenden Beschreibung des Sensoraufbaus und des Messsystems wird auf die Arbeiten von Geyer et al. (1998) und Herold et al. (2001) verwiesen.

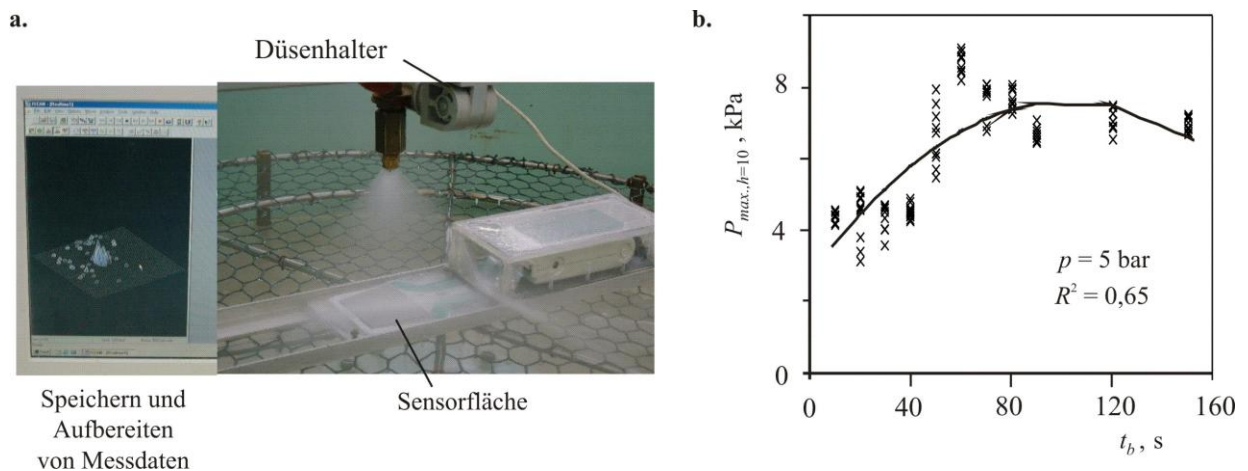


Bild 4.8 (a) Anordnung des Foliendrucksensors zur Bestimmung der Aufprallkräfte der Strahlen sowie (b) statistische Stabilität der Messergebnisse des Maximalaufpralldruckes $p_{max,h=10}$ auf den Strahldruckflächen A_P in Abhängigkeit der Belastungsdauer t_b

Der Sensor, zum Schutz vor möglicher Beschädigung mit dünner Folie bedeckt, wurde jeweils für eine definierte Belastungsdauer den Wasserstrahlen ausgesetzt. Um mit dem Sensor die gesamte Strahlaufprallfläche A_P zu erfassen, wurde der Sensor in der Messebene h_a in Schritten von 25 mm verschoben. Die Massenstromdichte $C_{s,sp,h=f(z)}$ wurde unter Annahme einer gleichmäßigen Flüssigkeitsverteilung über die Strahlfläche abgeschätzt.

Entsprechend dem Sauter-Durchmesser d_{32} der Tropfengrößenverteilung ($d_{32} = 277 \mu\text{m}$) der kleineren Düse E1 bei einem p von 3 bar ($Q = 1,55$ l/min) errechnet sich eine mittlere

Tropfenfrequenz in einem Arbeitsabstand $h_a = 10$ cm von ca. $5,2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ (5,2 kHz). Die zu erwartenden Tropfenfrequenzen über den vergleichbar kleinen Teilbereich in der Strahlfläche A_s von $1,6 \text{ mm}^2$ liegen somit deutlich über der Abtastfrequenz (10^2 Hz) der Pixelfläche des Sensors und sind mit dieser nicht synchronisiert.

Zur Messung der Aufpralldruckverteilung der gesamten Strahlfläche A_s ($A_{s,h=10} \approx 71,9 \text{ cm}^2$) bei E1 wurde die durch Messung der Flüssigkeitsverteilung ermittelte $b_{s,l}$ von 22,4 cm durch das seitliche Verschieben des Sensors in 8 Schritten zu 25 mm abgetastet. Es entstand eine Überlappungsbreite von ca. 31 mm zwischen zwei benachbarten Belastungsframes. Die mittlere Anzahl der Tropfen pro Pixel und Sekunde, d. h. die mittlere Tropfenzahldichte D , errechnet sich daraus zu 0,21. Für die obigen Randbedingungen sei die Wahrscheinlichkeit mit Hilfe einer Poisson-Verteilung $P_D(\Omega)$, dass in einer Sekunde ein Tropfen pro Pixel $P_D(\Omega=1) = \lambda^\Omega e^{-\lambda} / \Omega!$ (Häufigkeit, $\Omega = 1$) registriert wird, gleich 0,17. Eine Erfassung der zeitlichen Druckverläufe einzelner Tropfenaufprallereignisse ist somit durch das Messsystem des Sensors nicht möglich. Die Wahrscheinlichkeit, mit wenigen Framesequenzen der Messung den maximalen Druck an jedem Pixel des Sensors zu erfassen, ist sehr gering und von den Tropfenfrequenzen, der Abtastfrequenz, der Wirkdauer des Tropfenaufpralldruckes und der Integration je Pixel (ca. $3 \mu\text{s}$) abhängig. Mit den Randbedingungen des Sensors und der vorliegenden Tropfenfrequenzen ist nicht ersichtlich, ob die kleineren Messwerte während des Druckauf- bzw. -abbaus (im Resonanzbereich) eines Tropfenaufprallereignisses bestimmt worden sind oder tatsächlich den Maximalaufpralldruck kleiner Tropfen darstellen.

Gemäß **Abschnitt 4.2.2** ist das Reinigungs- bzw. Schädigungspotential der Strahlen auf der Gemüseoberfläche von der Höhe der spezifischen Druckbelastungen der Tropfen abhängig. Schwerpunktmäßig stand daher die Gewinnung von Angaben über die lokal auftretenden maximalen Belastungen aus den mittels Foliensensor erhaltenen Messsignalen im Vordergrund.

In diesem Zusammenhang sind bei der Strahlbewertung aus der zufällig registrierten Anzahl der pixelbezogenen Drucksignalwerte die Maximalwerte berücksichtigt worden. Die Wahrscheinlichkeit, den gesuchten Maximaldruck zu erfassen, erhöht sich mit der Messdauer.

Um Sicherheit über eine minimal erforderliche Belastungsdauer zu gewinnen, wurden mehrere Frameaufzeichnungen in Variation der Belastungsdauer erzeugt.

Ziel war u. a. den Zeitaufwand für die Messungen zu optimieren und die Messwerte auf ihren Stabilitätsgrad zu untersuchen.

Bild 4.8a zeigt die Beziehung zwischen dem für jedes Strahlbelastungsframe ermittelten Maximaldrucke $P_{max,h=10}$ für $p = 5$ bar und der entsprechenden Dauer der Sensorbelastung.

Aus der Aufpralldruck-Belastungsdauer-Kurve für die Strahldruckflächen $A_{p,h=10}$ zeigt sich erwartungsgemäß ein ansteigender Verlauf mit Übergang in die Sättigung. Das heißt, nach einer Mindestmesszeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass quasi für jeden Pixel der Maximaldruck mindestens einmal erfasst wurde, nahezu 1. Die Analyse der Kurve zeigt auch, dass die mittleren Messwerte, die pro Messreihe gleicher Belastungsdauer ermittelt worden sind, mäßigen Schwankungen unterliegen ($SD_{max} = 0,67 \text{ kPa}$). Bei höheren Belastungszeiten streuen die

mittleren Werte in einem schmalen Bereich und pegeln sich auf einen engen Wertebereich ein. Für die Durchführung der Messungen wurde somit für alle Versuchsreihen einheitlich eine Belastungsdauer von 120 s, d. h. 12 000 Frames pro Messreihe festgelegt. Damit ergibt sich bezüglich der Wahrscheinlichkeitsberechnung mit Hilfe der Poisson-Verteilung (mittlere Tropfenzahldichte $D = 0,21 \text{ /s}$) eine messbare mittlere D von ca. 25 Tropfen pro Pixel.

Die vom Messsystem erzeugten Rohdaten (binäre Zahlen zwischen 0 und 256) wurden anschließend mittels einer im ATB entwickelten Auswertesoftware ausgewertet.

Auswertung der Messsignale

Mit Hilfe des für die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten neuentwickelten Programms wurden nacheinander folgende Aufgabenstellungen abgearbeitet, die aus den Anforderungen bei der Gewinnung des abtragsrelevanten Parameters aus den Rohdaten resultieren.

a. Umrechnung der vom Meßsystem erzeugten Binärwerte in pixelbezogene Kraftwerte

Herold et al. (2001) stellten in ihrer Untersuchung fest, dass die Beziehung zwischen den Messwerten mittels Sensor und der tatsächlich angebrachten Gesambelastung nicht linear war und daher eine geeignete Kalibrierfunktion zum Ausgleich des Unterschieds benötigt wird. Daraufhin wurde von Truppel et al. (2001) bereits ein Verfahren zur Sensorkalibrierung sowie ein Programm zur Berichtigung der gemessenen Binärwerte durch die errechnete mittlere Kalibrierfunktion entwickelt. Mittels dieser Kalibrierfunktion erfolgt die Umrechnung der Messwerte in Kraftwerte.

Aufgrund der begrenzten Haltbarkeit der Sensoren bei Kontakt mit dem Strahl kamen im Laufe der Untersuchungen mehrere Sensoren mit unterschiedlicher Empfindlichkeit zum Einsatz. Sie wurden jeweils vor ihrer Anwendung neu kalibriert. Trotzdem wurden Unterschiede an den pixelbezogenen Messwerten der Aufprallkraft bei gleichen Spritzbedingungen registriert. Somit ist anzunehmen, dass die messtechnischen Bedingungen der Kalibrierung zur Berechnung der mittleren Übertragungsfunktion der Einzelpixel die dynamischen Vorgänge eines Wasserstrahls nicht wiedergeben. Daher sind die bei der Strahlcharakterisierung betrachteten Werte des Aufpralldruckes als vom eingesetzten Sensor abhängige Werte zu betrachten. Sie genügen jedoch zur Vergleichsanalyse der Strahlen.

b. Bereinigen der Messdaten von defekten Pixel mit Dauersignalen

Dies erfolgte durch Subtrahieren eines vor Beginn der Versuchsreihe aufgenommenen, belastungsfreien Nullframes von den Framesequenzen einer Messreihe mit den Belastungswerten.

c. Erstellen von Belastungsframes mit pixelbezogenen Maximalwerten

Hierzu wurde zur Bestimmung der Strahldruckfläche $A_{P,h=f(z)}$ die Kraftschwelle bestimmt, die entsprechend der mit dem Foliensensor erfassten Werte der maximalen Aufprallkraft überschritten werden muss. Für die kleinen Tropfengrößen d_t bis 300 μm (vgl. **Abschnitt 3.5**) ist mit Hilfe der PDPA-Messungen eine Maximalkraft F_{max} von 0,002 N über die Beziehung $F_a = m_t v_t \sin \theta_s / t$ errechnet worden, die hier als Mindestgröße definiert wurde.

Durch den Vergleich der pixelbezogenen Messwerte aller Framesequenzen eines Messvor-

ganges wurde ein Belastungsframe mit den Maximalmesswerten der einzelnen Pixel, die über dem vorbestimmten Schwellenwert liegen, generiert. Dieses Belastungsframe stellt für jedes Pixel den maximal aufgetretenen Aufpralldruck bei einer entsprechenden Belastungsdauer des Sensors dar.

d. Zusammenfügen der überlappenden Belastungsframes einer Strahlfläche

Mittels des pixelbezogenen Messwertvergleichs und Substituierens durch die höheren Messwerte der Pixel der überlappten Sensorfläche wurden die Einzelframes zu einem Belastungsframe der entsprechenden Strahlfläche zusammengesetzt.

e. Ermittlung der abtragsrelevanten Strahlparameter

Eine Filtermaske in der Flächengröße von 5 x 5 Pixel wurde in einem ersten Schritt über das Belastungsframe geschoben und so eine Dichte für die Flächengröße der Filtermaske errechnet. Die Pixel, deren Dichtewerte einen Schwellenwert (20 % der maximal an einem Pixel vorhandenen Dichte) unterschreiten, wurden vernachlässigt und zu 0 gesetzt. Von den 25 Pixeln innerhalb der Filtermaske müssen mindestens 5 Pixel belegt sein. Diese Pixel werden auf jeweils den Wert eins gesetzt und bilden damit eine binäre Maske zur Selektion der auszuwertenden Pixeldaten. Die Filterfunktion schließt dabei kleine Flächenlöcher, d. h. nicht mit Werten belegte Pixel. Ein nachgeschalteter Algorithmus entfernt kleine Pixelcluster, d. h. nicht-verbundene Einzelpixel (Spritzer), außerhalb der Strahlfläche. Nach der Filterung der Belastungsframes mit der Dichtefunktion wird die Größe der wirksamen Druckfläche $A_{P,h=f(z)}$ aus der mit Kraftwerten belegten Pixelzahl errechnet. Im Ergebnis liegen sowohl die für die wirksame Spritzfläche repräsentativen, räumlich aufgelösten Verteilungen der Strahlkraft pro Pixelfläche vor, als auch die Werte bezüglich der mittleren Maximalkraft für die jeweilige wirksame Strahlfläche A_s .

4.2.2.1.4. Verteilung der dynamischen Strahlwirkung

Im Unterschied zum Foliensensor, mit dem die Charakterisierung des Strahlaufpralls unabhängig von der Wirkung der Materialeigenschaft der Sensoroberfläche erfolgt, wurde die Aufprallwirkung der Strahlen auf deformierbare Testkörper untersucht. Unter dem Einfluss der spezifischen Eigenschaften der Testkörper wurde die Abtragseffektivität der Strahlen, d. h. die Initiierung der Materialtrennung und der anschließende Materialabtrag, bewertet.

Als Testkörper wurden standardisierte Sand-Bindemittelgemisch-Platten entwickelt (vgl. **Anhang A**), welche unter den zu untersuchenden Strahlbelastungen einen definierten Materialabtrag zuließen, jedoch ohne völlig zu zerfallen. Die senkrecht zur Düsenachse angebrachten Testkörper wurden den Strahlen bei variablen Betriebsparametern ausgesetzt (**Bild 4.9a**).

Als Basis zur Charakterisierung der Strahlen bezüglich ihrer Abtragseffektivität wurden die Abtragstiefe t_a und die Abtragsfläche A_a der auf den Testkörperoberflächen gebildeten Abtragsspuren mittels Laserscanner ermittelt. Die Verteilungen der t_a innerhalb der A_a wurden dabei in einer räumlichen Auflösung der gemessenen Abtragstiefen von $1,3 \times 1,3$ mm generiert. Tiefenwerte, die kleiner als 0,3 mm waren, wurden vernachlässigt. Dieser Schwellen-

wert wurde als Mittelwert aus den Verteilungen der Tiefenmessungen von unbelasteten Testkörpern gewonnen.

Bild 4.9b stellt am Beispiel der Strahlen von E1 in 10 cm Arbeitsabstand h_a bei Druck p von 5 und 8 bar die erzielten Mittelwerte für Abtragstiefe t_a dar. Aufgrund der Streuung wurde jede Messreihe 5mal wiederholt und der Mittelwert gebildet.

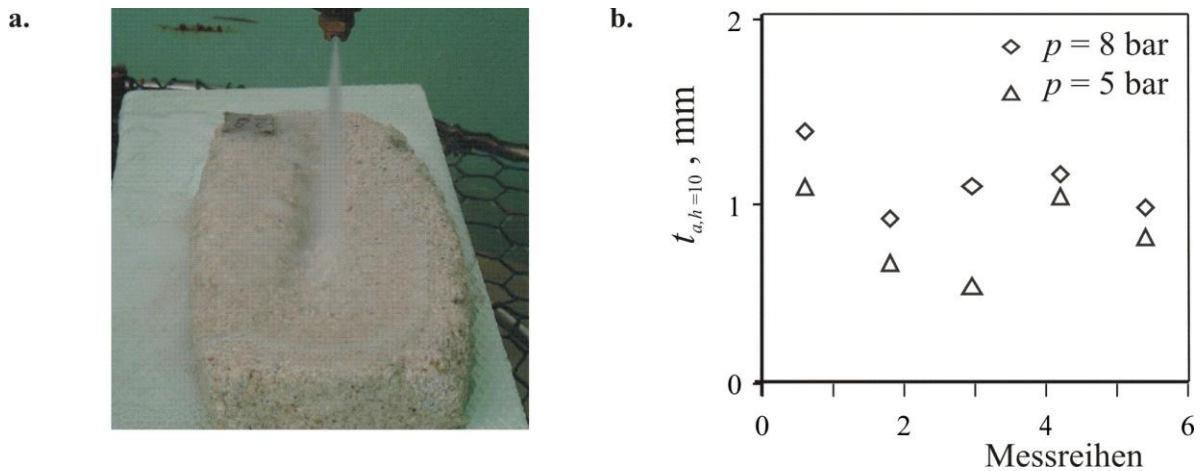


Bild 4.9 (a) Beanspruchung des Testkörpers ($30 \times 10 \times 2$ cm) durch Wasserstrahl sowie (b) statistische Stabilität der Messergebnisse der mittleren Abtragstiefe t_a der Abtragsflächen A_a bei verschiedenen Messreihen und 2 Spritzdrücken ($h_a = 10$ cm; Düse E1)

Die spezifischen Abtragsvolumina auf den Testkörpern wurde mit den Messdaten zur spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ bzw. zum maximalen Strahldruck P_{max} in Beziehung gesetzt.

Im Rahmen der energetischen Betrachtung der gebildeten Tropfenspektren wurde eine zusätzliche rechnerische Vergleichsgröße "Abtragseffizienz" $E_{s,ve}$ nach **Gleichung 4.3** eingeführt. Dieser Parameter ermöglicht eine Bewertung der Strahlen bezüglich des effektiven Abtragsvolumens pro Einheit des hydraulischen Energieaufwands.

$$E_{s,ve} = t_a \cdot A_a / p Q \quad (4.3)$$

Eine weitere Größe, um die Abtragseffektivität sowie die Effizienz der Wasserstrahlen zu vergleichen, ist die "Flächenratio" ξ_{ae} . Sie drückt das Flächenverhältnis aus zwischen der auf dem Aufprallmaterial für die Beanspruchungsdauer erzielbaren effektiven Strahlabtragsfläche A_{ae} und der unter den gleichen Bedingungen erzeugten Fläche A_s der Strahlverteilung.

4.2.2.2. Teilflächendifferenzierte Betrachtung von Messdaten der Strahlparameter

Bevor in **Abschnitt 5.2** die Reinigungseffizienz der Strahlen über ihre gesamte Verteilungsfläche als Funktion der Prozessparameter teilflächenbezogen analysiert wird, erfolgt zunächst die Beschreibung der funktionellen Beziehungen der verschiedenen Parameter im Abtragsprozess. Dies geschieht zunächst durch die globalen mittleren Werte der Strahlparameter einzelner Strahlflächen, die flächengewichtet aus mehreren Messungen an verschiedenen Orten

im Strahl (r_s , h_s) ermittelt sind.

Die Verteilung der Strahlen über die Aufprallfläche ist jedoch hinsichtlich der Anzahl, Dichte, Tropfengröße, Geschwindigkeit und des Aufprallwinkels $\theta_{s,h=f(z)}$ unterschiedlich. Dabei ist in Abhängigkeit vom Arbeitsabstand h_a , Düsendurchmesser d_d und Spritzdruck p die Art (statisch, dynamisch oder gemischt) und die Verteilung der Strahlbelastung von großer Bedeutung. Die Inhomogenität des Strahls hinsichtlich seiner Makro- und Mikrostrukturen (vgl. **Abschnitt 3.5**) ruft, wie die Messergebnisse widerspiegeln, Unterschiede hervor bezüglich der Strahlwirkungsmechanismen, der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ und der daraus resultierenden Höhe der Materialbeanspruchung (vgl. **Abschnitt 3.2.3**). Diese Strahleigenschaften variieren dabei stark vom Kernbereich radial zum Randbereich.

Schwerpunktmäßig stehen daher die Definition der repräsentativen Teilflächen und die teilflächenbezogene Aufbereitung der repräsentativen Strahlstrukturparameter im Vordergrund.

Die Strahlaufprallflächen A_s werden zur detaillierten Strahlbewertung hinsichtlich des Abtrags- bzw. Schädigungspotenzials teilflächenbezogen betrachtet und in 3 Teilflächen TF entsprechend des Radius r_s von der Strahlachse aufgeteilt. Auf Grundlage der festgestellten Variationsbreiten der Messdaten über den Strahlquerschnitt wurde dabei der $\theta_{s,h=f(z)}$ der Strahlsegmente und Tropfen herangezogen. Demnach erfolgte die Aufteilung der A_s in die Teilflächen, wie auch schematisch in **Bild 4.10** dargestellt, mit Angaben der im Rahmen der Untersuchung erfassten Strahlaufprallwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ und Strahlteilflächen.

- Strahlkern [K]

Der Strahlkern [K] umfasst die Strahlzone im Düsennahbereich von $-40 \text{ mm} \leq r_{s,h=f(z)} \leq +40 \text{ mm}$, in dem weitgehend axiale Geschwindigkeitskomponenten des Strahls mit einhergehender *Stoßdruck-* oder *Schlagbeanspruchung* auftreten (vgl. **Abschnitt 3.2.3**). Der Strahl im [K] ist in Abhängigkeit von Spritzdruck p und Volumenstromrate Q überwiegend zusammenhängend (vgl. **Bild 3.3**) bzw. kompakt (statisch/dynamisch/überlagert).

- Strahlmitte [M]

In der Strahlmitte [M] bei $\pm 40 \text{ mm} < r_{s,h=f(z)} \leq \pm 80 \text{ mm}$ kommt es zu einer Verschiebung vom axialen und zusammenhängenden Strahlanteil hin zu einer Überlagerung der radial und axial wirkenden Geschwindigkeitskomponente des Strahls mit nachfolgender Zunahme der *Erosionsbeanspruchung*. In Abhängigkeit der Betriebsparameter (h_a , p und d_d) bewirkt diese radiale Ausweitung den Anstieg des Tropfenstrahlanteils mit verringertem spezifischen Strahlvolumenanteil.

- Strahlrand [R]

Der Strahlrand [R] bei $r_{s,h=f(z)} > \pm 80 \text{ mm}$ ist durch abnehmenden axialen Geschwindigkeitsanteil des mit Luft durchmischten, zerstäubten Strahls und daraus resultierenden Schubbeanspruchung gekennzeichnet. Dieser äußert sich wiederum in einer deutlich geringeren Strahldichte bzw. in einem Abfall des spezifischen Volumenanteils des Tropfenstrahls.

Daher wurde für die Versuche an Gemüse ein Auswerteverfahren erarbeitet, das auf einer teilflächenbezogenen Betrachtung der Messergebnisse beruht.

Die gewonnenen Messdaten der Strahlstruktur liegen in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor. Die Datenaufbereitung erfolgte derart, dass die Daten mit höherer räumlicher Auflösung unter Berücksichtigung des Grades der Veränderungen in der Strahlstruktur untereinander flächengewichtet ($A_s \sim r_s^2$) zusammengefasst und an den punktuellen Messdaten der PDPA-Messungen korreliert wurden. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Punktmessung auf einem Radius r_s repräsentativ für den ganzen Kreisring ist, in dem sich der Messpunkt bzw. die Messfläche befindet.

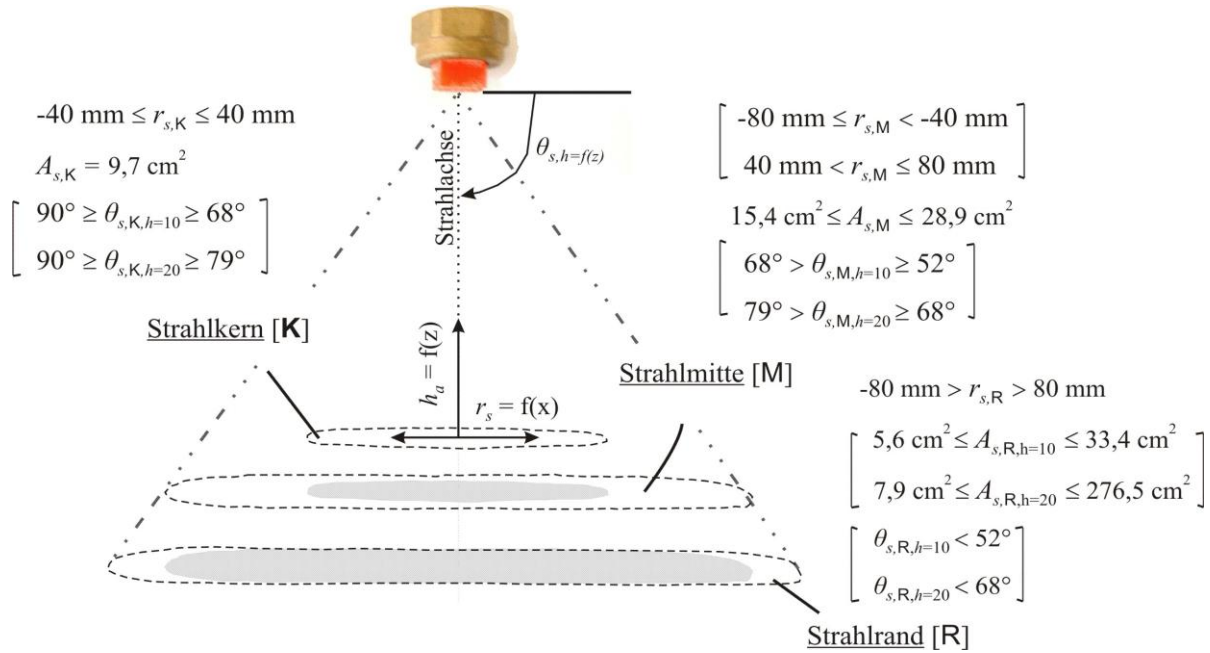


Bild 4.10 Schema zur Bildung der Strahlteilflächen für Flachstrahldüsen in Abhängigkeit von Strahlradius r_s und Strahlwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ bei zwei Arbeitsabständen h_a von 10 und 20 cm

Im Ergebnis sind die Teilflächen mit weitgehend repräsentativen Strahlstrukturdaten aufbereitet worden. Die teilflächenbezogenen Daten werden in jeweiliger Formel mit dem Index K, M, R (vgl. **Bild 4.10**) bezeichnet.

4.2.2.3. Aufbereitung und statistische Auswertung der Strahlstrukturdaten

Bei Bewertung der Strahleffektivität, -effizienz und des Schädigungspotentials wird die statistische Auswertung für die jeweilige Strahlteilfläche durchgeführt, um der vorliegenden Inhomogenität der Messdaten innerhalb der Strahlfläche A_s anzupassen.

Entscheidend ist hier die Frage, wie unter Berücksichtigung der Variation der teilflächen Verteilungen die daraus abgeleiteten statistischen Größen (Mittelwerte, Korrelationen und Regressionen) ermittelt werden.

Die kombinierte Analyse der verschiedenen Messdaten (Volumenverteilung $V_{s,sp}$, PDPA-Messungen sowie Verteilung des Strahlaufpralldrucks P_{max} und der Abtragstiefe t_a) wurde mit einem am ATB entwickelten Auswertungsprogramm durchgeführt, in dem die Angaben zur Bildung der Teilflächen standardmäßig eingebaut sind. Mit Hilfe des Programms wurden verschiedene Kenndaten der Strahlen für jede einzelne Teilfläche berechnet.

Um Abtragsfläche $A_{a,h=f(z)}$ und abgetragenes Volumen in Beziehung zu den Strahlflächen A_s und -strukturdaten zu setzen, wurden in einem ersten Schritt aus den mit der Vorrichtung aus **Bild 4.6** gewonnenen Strahlverteilungsdaten Verteilungsfunktionen approximiert.

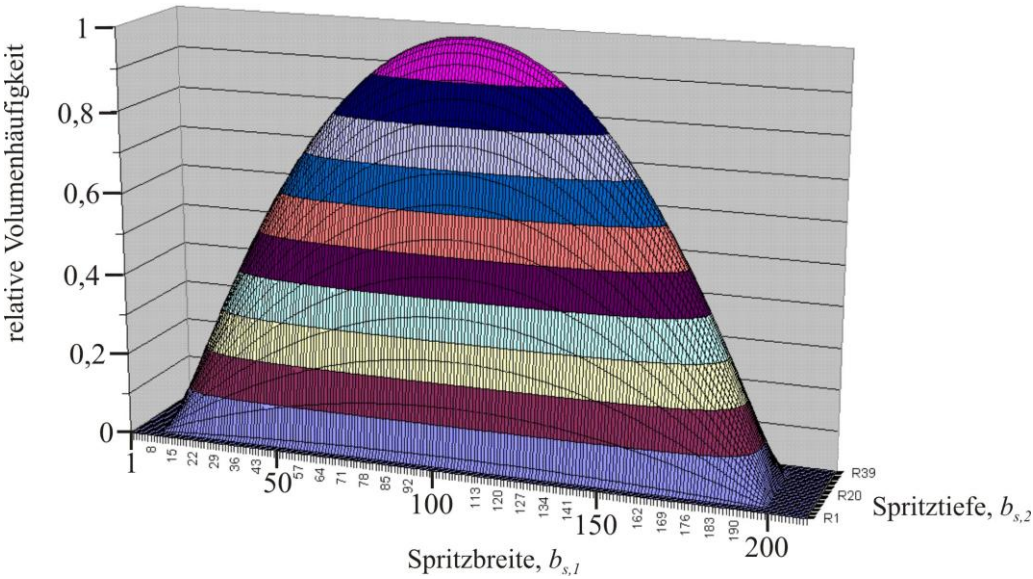


Bild 4.11 Qualitative Darstellung der Strahlverteilung über die Strahlfläche A_s

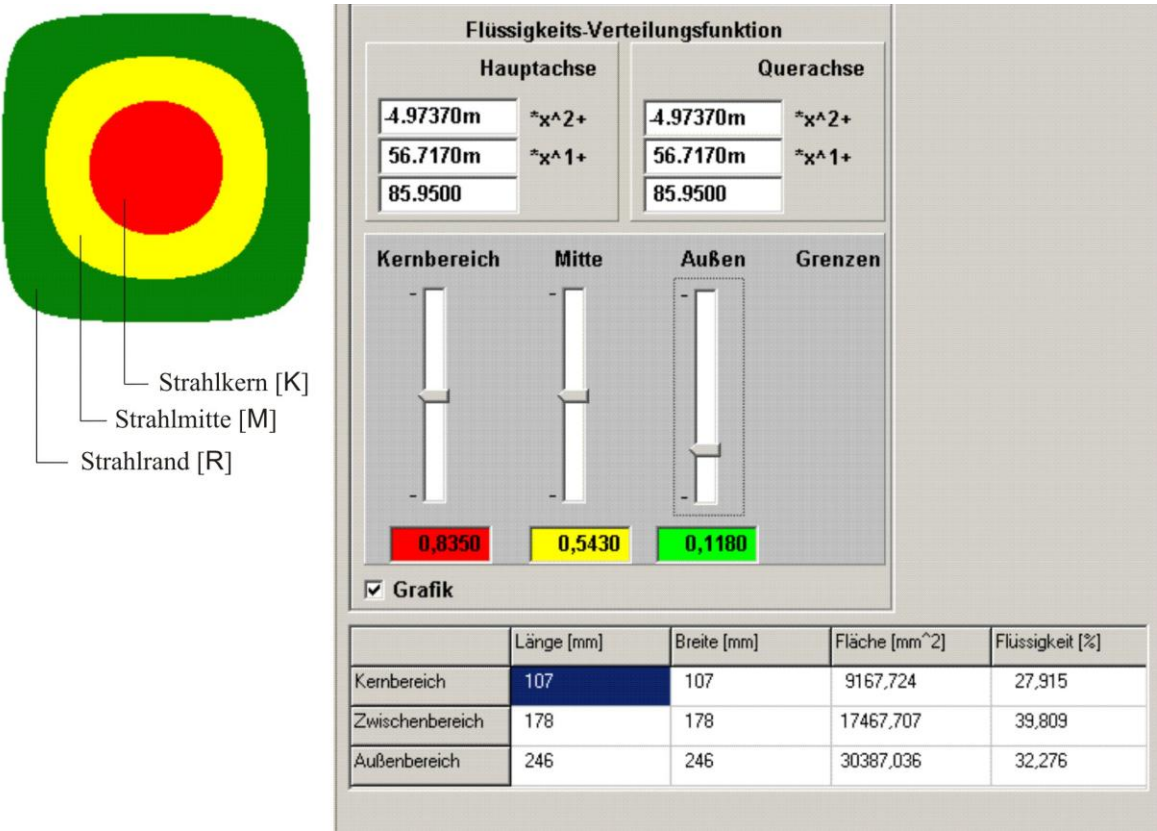


Bild 4.12 Programm zur Definition von Schwellen für die Flüssigkeitsverteilung und zur Definition von Masken (Strahlteilfläche) zur Auswertung weiterer Messdaten

Wegen der geringen Datenauflösung wurden Funktionen 2. Ordnung in X- und Y-Richtung verwendet, so dass sich beispielsweise die in **Bild 4.11** dargestellte qualitative Verteilungsfunktion ergibt, deren quantitative Parameter jeweils durch die Software errechnet wurden. Bezogen auf diese Verteilungsfunktionen der Strahlvolumen konnten nun mit einem speziellen Programm durch Definition von Schwellen (Kraftschwelle, vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.3**, und Schwellenwert der Abtragstiefe, vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.3**) und Masken zur Erstellung von Strahlteilflächen erzeugt werden (**Bild 4.12**).

Im zweiten Schritt wurden nun als Mittelwert für jede der Strahlteilflächen (farblich dargestellt in **Bild 4.11**) eine Reihe von Variablen der relevanten Strahlparameter wie $V_{s,sp}$, $C_{s,sp}$, P_{max} und t_a ermittelt. Dabei wurden die lokal gemessenen Strahldaten in den Messflächen der verschiedenen Strahlteilflächen über ihre Flächengröße automatisch gewichtet. Zudem wurden anhand von voreingestellter Klasseneinteilung die teilflächenbezogenen Verteilungen der Strahlparameter geliefert.

4.2.2.4. Abschätzung des Schädigungspotentials der Strahlen am Gemüse

Auf die hydromechanischen Belastungen reagieren verschiedene Gemüsearten aufgrund ihrer vielfältigen Produkteigenschaften sehr unterschiedlich. Die spezifischen Strahlbelastungen, die auf das zu entfernende Erdmaterial wirken und seinen Abtrag veranlassen, können jedoch auf der zu reinigende Gemüseoberfläche qualitätsmindernde Beschädigungen hervorrufen. Neben äußerlich sichtbaren Beschädigungen sind auch Transpirationsverluste, sowie die Verstärkung des physiologischen Abbaus von Inhaltsstoffen und schließlich vorzeitiger Verderb die Folgen.

Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die untersuchten Strahlvarianten zur Bestimmung ihrer Reinigungs- und Schädigungspotentiale an verschiedenen Gemüsearten.

Tabelle 4.3 Versuchsreihen zur Ermittlung der Reinigungs- und Schädigungspotentiale von Strahlen am Frischgemüse (Kopfsalat, Spargel und Möhren)

Versuchs- düse	h_a , cm	p , bar	Strahlvariante	Messverfahren zur Strahlbewertung			
				Bonitur	Gas- wechsel	Wasser- potential	Mikro- relief
E1	10	3	E1_13				
		5	E1_15				
		8	E1_18				
E3	10	3	E3_13				
		5	E3_15				
		8	E3_18				
E4	10	3	E4_13				
		5	E4_15				
		8	E4_18				

Im Versuchsstand (vgl. **Bild 4.5**) wurden die senkrecht zur Düsenachse liegenden Frischgemüse definierten Wasserstrahlen unterschiedlicher Impulsintensität $I_{s,sp}$ für eine festgelegte Belastungsdauer t_b von 10 bis 15 s (vgl. **Tabelle 4.2**) ausgesetzt.

Zur Ableitung des Belastungspotentials bei der Schädigung der Gemüse wurden sowohl die äußeren als auch die inneren Veränderungen der Produkte erfasst und bewertet. Zur objektiven Bewertung innerer und äußerer Gemüseschädigungen bzw. zur Ermittlung der Empfindlichkeitsgrenze verschiedener Gemüsearten wurden unterschiedliche Messmethoden genutzt. Die Bewertung der sichtbaren Beschädigungen erfolgte, insbesondere bei Kopfsalat, durch Bonituren in 3 **Beschädigungsklassen**. Das Bonitieren der Beschädigungen umfasst die Aufnahme der Art und Dichte der Beschädigungen auf der zu beurteilenden Gemüseoberfläche.

1. leicht- bis unbeschädigte Gemüse (vereinzelte, punktuelle Beschädigung)
2. wenige flächenhafte Beschädigungen
3. viele flächenhafte qualitätsmindernde Gewebebeschädigungen

Um die Einflüsse der Strahlbelastungen auf Frischgemüse mit zunächst nicht oder kaum sichtbaren Beschädigungen bewerten zu können, wurden Atmungsmessungen, Messungen des Wasserpotentials und der Oberflächenmikrotopographie durchgeführt.

Physiologische Eigenschaften, Atmungsrate und Transpiration

Die *Atmungsintensität* wird u. a. von der Art und dem Reifegrad bestimmt (Böttcher 1994).

Ein Anstieg der Atmungsintensität als Produktreaktion auf Belastung ist dabei im Allgemeinen proportional zum Grad der Beschädigung (Kader 1987).

Die CO₂-Abgabe der Kulturen wurde mittels eines geschlossenen Systems gemessen, das mit Infrarot-Sensor (FYA600_{CO2}, Ahlborn Mess- und Regeltechnik, Holzkirchen, Deutschland) ausgerüstet ist. Für die CO₂-Messung wurde in die Messkammer die gleiche Anzahl an Produkten und die gleiche Masse auf $\pm 20\text{g}$ eingelagert. Alle Produkte in einer Messkammer wurden den Strahlen unter gleichen Spritzbedingungen und somit ähnlichen Belastungszuständen ausgesetzt. Als Kontrolle dienten von Hand gewaschene, unbelastete Gemüse. Die Erfassung der CO₂-Messung erfolgte kontinuierlich über einen Zeitraum von ca. 2 h. Das Messintervall betrug 10 min. Aus der Steigerung der CO₂-Konzentration in den geschlossenen Plexiglaskammern über einen festgelegten Zeitraum wurde die Atmungsaktivität der Frischmasse $\text{mg}_{\text{CO}_2} \text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ errechnet.

Als weiterer Parameter wurde das *Transpirationsverhalten* von Gemüse nach seiner hydro-mechanischen Belastung unterschiedlicher Intensität untersucht.

Die grundlegenden Beziehungen zur Bestimmung der Transpirationsrate E der Produkte sind u. a. von Linke (1997) detailliert beschrieben worden.

Um den Ausgangszustand der Produkte und die Einflüsse der Strahlbelastung zu charakterisieren, wird zunächst die flächenbezogene Transpirationsrate E verwendet, welche sich aus den Frischmasseverlusten bezogen auf die Druckfläche A_p und Zeit t errechnen lässt.

Des Weiteren lässt sich E durch den Bezug der Unterschiede im volumenbezogenen Wassergehalt auf die effektiven Gewebe- r_T und Grenzschichtwiderstände r_B bestimmen (**Bild 4.13**). Der r_T kann zur Analyse des Produktverhaltens unter variierenden Bedingungen der Nachernnte verwendet werden. Der zeitliche Verlauf der Transpirationskoeffizienten E_c ist dabei von der Änderung des r_T im Wasserdampfpfad abhängig.

Gemäß den Vorgaben von Linke (1998) zur Bestimmung der abhängigen Größe Gewebewiderstand sind die dafür nötigen Inputparameter erfasst worden. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte wurden gemessen und daraus die absolute volumenbezogene Luftfeuchtigkeit berechnet. Die Oberflächentemperatur des Produktes wurde berührungslos mit einem Infrarotthermometer bestimmt.

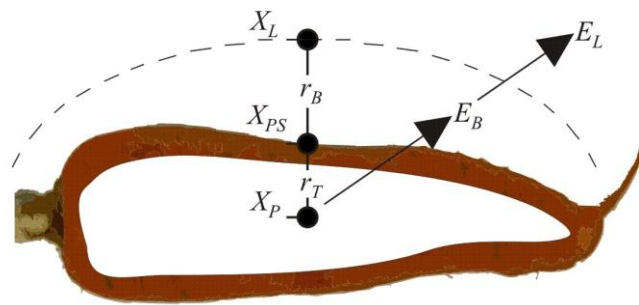


Bild 4.13 Relevante Größen zur Bestimmung des Transpirationsverhaltens

Atmungswasserverluste jeder Spargelstange und Möhre wurden durch das fortlaufende Wiegen unter kontrollierten klimatischen Bedingungen festgestellt. Die äußerliche A_p und der r_B wurden entsprechend Linke (1998) ermittelt. So wurden während der eigenen Versuche zur Erfassung des Ausgangszustandes (Gewicht und Geometrie) nur Durchmesser und Länge der zu untersuchenden Kulturen gemessen.

Mit dem ermittelten Zusammenhang zwischen den Größen ist es möglich, durch die Änderungen der CO_2 -Abgabe, der Transpirationsintensität und des r_T der Produkte das Schädigungspotential der Strahlen abzuschätzen. Um das Vorliegen einer qualitätsmindernden Strahlendruckbeschädigung zu erklären, ist u. a. eine produktspezifische Kenngröße, die das Transpirationsverhalten unter gegebenen klimatischen Bedingungen beschreibt, sowie ein Grenzwert für den verstärkten physiologischen Abbau festzulegen.

Wasserpotential

Als drittes Verfahren zur Untersuchung der Wasserstrahlwirkung auf Frischgemüse wurde die Veränderung des *Wasserpotentials* Ψ_p von belasteten Frischmöhren herangezogen.

In den Leitelementen eines transpirierenden Produktes herrscht in der Regel ein Unterdruck. Das heißt, das Wasserpotential Ψ_p im Produkt ist negativ. Das Ψ_p korreliert stark mit physikalischen Eigenschaften des Möhrengewebes (Golacki 1993). Die Einflüsse mechanischer Belastungen während der Produktaufbereitung lassen sich durch die Veränderungen im Ψ_p erfassen (Herppich et al. 1999).

Zur Beurteilung der Änderung des Gesamtwasserzustandes an durch Strahl unterschiedlicher Intensität belasteten Möhren wurden Wasserpotentialmessungen mit einer Druck-Bombe nach Scholander (Plant Water Status Console 3000, Soilmoisture Inc., Santa Barbara, CA, USA) durchgeführt (**Bild 4.14**). Zum Aufbau einer solchen Scholanderbombe und zum Messprinzip

wird auf die Arbeiten von v. Willert et al. 1995, Herppich et al. 1999 verwiesen.

Baut man die Möhre in das Druckgefäß (1) ein, so dass die Wurzel aus der Dichtung (3) herausragt und erhöht im Druckgefäß solange den Innendruck bis der Meniskus des Wasser-

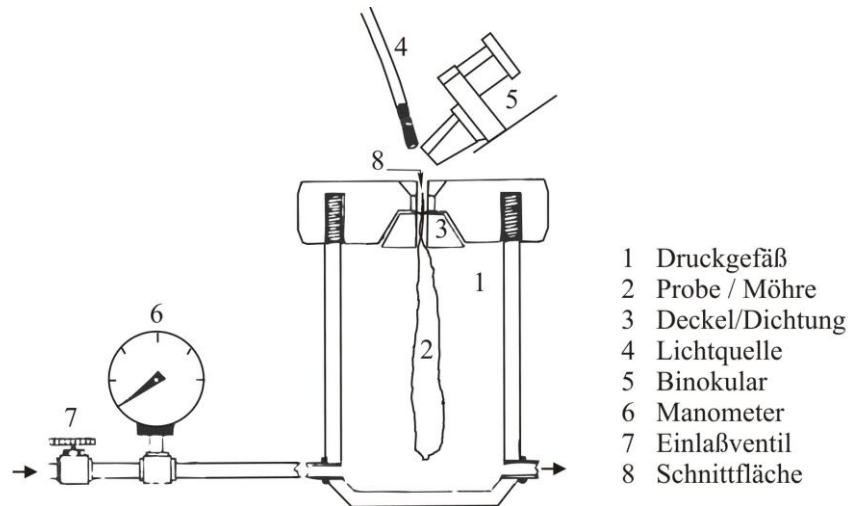


Bild 4.14 Schematischer Aufbau einer Druckbombe nach Scholander

fadens an der Schnittfläche (8) auftaucht, muss der dann im Gefäß herrschende Überdruck dem in der Möhre bestehenden negativen Druck entsprechen. Diesen kann man dem Wasserpotential der Probe (2) gleichsetzen. Zur Erzeugung des notwendigen Überdruckes wird Druckluft aus Druckflaschen verwendet.

Das Ψ_p in den Möhren, das für eine definierte Dauer den Belastungen durch auf deren Oberfläche aufprallende Strahlen ausgesetzt wurde, ist vor und nach der Belastung bestimmt worden. Die Differenz zwischen diesen Messungen stellt somit ein Maß für die Reaktion des Produkts auf die Intensität der Beanspruchung dar. Parallel hierzu wurde jeweils auch die Transpirationsrate E bestimmt.

Mikrotopographie

Zur quantitativen Erfassung möglicher Qualitätsveränderungen durch hydromechanische Belastung wurde die belastete Produktoberfläche mittels eines *mikrotopographischen* optischen Messverfahrens analysiert. Für die Anwendung dieses Verfahrens, welches ein dreidimensionales Abbild eines Oberflächenausschnittes des Produktes liefert, liegen im Gartenbau bisher nur sehr wenige Erfahrungen vor (Herold & Truppel 2003).

Untersucht wurden hier Verformungen und Rissbildungen an der Produktoberfläche. An frischen und durch Wasserstrahl belasteten Spargelstangen und Möhren wurden mikrotopographische Messungen zur Charakterisierung von Oberflächenveränderungen in Abhängigkeit der variierenden Inputparameter durchgeführt, für die das Messsystem NEMESIS (Fa. Jurca, Rodgau, Deutschland) zur Verfügung stand (**Bild 4.15**). Das Messsystem verwendet den optischen Abstandssensor CHR 150 N, der punktuell den Abstand zwischen einer Messebene und der Produktoberfläche (2) innerhalb eines vorgegebenen x-y-Fensters erfasst. Das Produkt wird unterhalb vom Messkopf (1) des Abstandssensors auf dem Messtisch (3) platziert. Der

Antrieb des Tisches verschiebt das Messobjekt unter dem Messstrahl in x- und y-Richtung und somit ist eine Abtastung in einem maximalen Messfenster von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ mit einer minimalen Schrittweite von $1 \text{ }\mu\text{m}$.

Die absolute Genauigkeit in z-Richtung wird mit 100 nm angegeben.

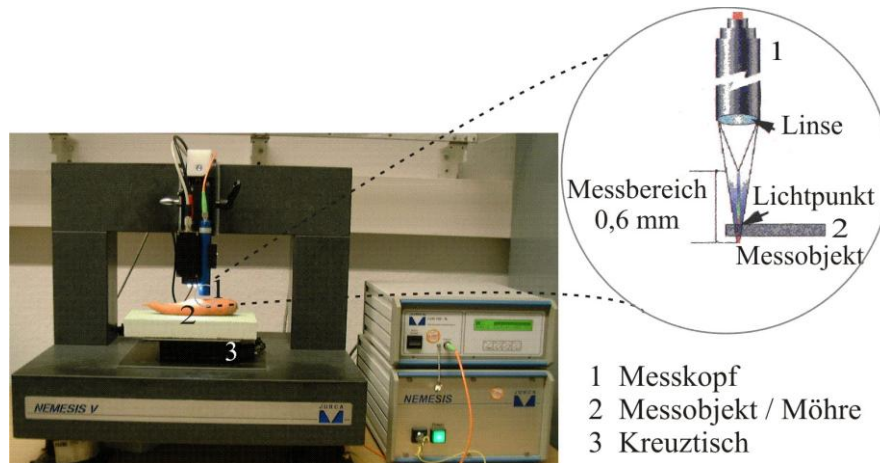


Bild 4.15 Die verwendete Apparatur zur Mikrotopographiemessung

Bei den untersuchten Produkten wurden die Veränderungen im Oberflächenprofil aus der vor und nach der Produktbeanspruchung untersucht, daraus den Aufpralleffekt der Strahlen abzuleiten. In die Betrachtung der Strahlwirkung auf die Gemüseoberfläche sind die Höhenprofile von minimal 6 Messfenstern auf der Gemüseoberfläche, deren Mittelpunkte vor dem Messvorgang farbig markiert wurden, eingegangen. Mittels der Oberflächenanalysesoftware Jurca Marc III_(Fa. Jurca, Rodgau, Deutschland) wurden 2D- und 3D-Darstellungen der gemessenen Oberflächen und Darstellungen ausgewählter Höhenprofile erzeugt und Standard-Rauigkeitsparameter bestimmt.

4.3. Ermittlung der Reinigungseffektivität in Praxisanlagen

Die Untersuchung der Reinigungseffektivität der Wasserstrahlen als Funktion der Düsen- und Betriebsparameter beschränkt sich auf den Abtragsvorgang des anhaftenden Erdmaterials von Gemüse nach der Ernte. In den Praxisanlagen wurden Reinigungseffizienz und Gültigkeit der gewonnenen Ansätze zur produktschonenden Belastung durch Strahlen im Hinblick auf die optimale Gestaltung der Waschtunnel überprüft.

Eine systematische Erfassung des Strahlreinigens wurde bisher nur ansatzweise durchgeführt (Schikorr 1986).

In dieser Arbeit wurde die Strahlbewertung zur effizienten und produktschonenden Gemüsereinigung nach subjektiven Kriterien beschrieben. Dabei wurde der Versuch unternommen den Reinigungsgrad der Strahlen auf der zu reinigenden Gemüseoberfläche zu erfassen und hieraus Möglichkeiten der Prozessoptimierung abzuleiten. Der Abtragsgrad des Erdmaterials von der Gemüseoberfläche wurde in Abhängigkeit der verschiedenen Strahlparameter durch Bonituren erfasst.

Dazu wurde ein Boniturschlüssel mit 4 verschiedenen **Reinigungsklassen** erarbeitet:

1. ungereinigt
2. teilweise (deutliche Schmutzabtragung nur im Strahlkernbereich)
3. mäßig gereinigt
4. sauber (marktfähiges Produkt, weitgehend ohne anhaftendes Erdmaterial)

In den Praxisanlagen wurde am Ende des Reinigungsprozesses eine Bonitierung / Abschätzung durchgeführt und eine Bewertung der Strahleffizienz nach Angaben des prozentualen Anteils an sauberem Gemüse, bezogen auf die gesamte Reinigungsmenge, durchgeführt.

Anhand von Veränderungen der Anteile in den verschiedenen Reinigungsklassen wurden die Optimierungsmöglichkeiten der variierbaren Prozessparameter für eine effizientere Strahlreinigung untersucht.

Um den angestrebten Reinigungserfolg bei teilweise bzw. mäßig gereinigten Produkten zu erzielen, wurden die Waschvorgänge wiederholt.

4.4. Verknüpfung der Untersuchungsergebnisse

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die funktionellen Zusammenhänge sowie den Einfluss verschiedener Düsen-, Betriebs- und Strahlparameter auf den Abtrags- und Reinigungsprozess zu untersuchen. Hierzu wurden sowohl Messungen an Makro- und Mikrostrukturen der Wasserstrahlen, deren Aufprallwirkung auf die Sand-Bindemittelgemisch-Platten sowie auf Gemüse in Labor- als auch unter Praxisbedingungen durchgeführt.

Zur grundlegenden Analyse der Abtrags-, Reinigungs- sowie Beschädigungspotentiale der Wasserstrahlen war es notwendig, die gewonnenen Versuchsergebnisse zu verknüpfen.

Die erfassten Ergebnisse bezüglich der Verteilung des Strahlaufpralldrucks P_{max} und der effektiven Abtragstiefe t_{ae} wurden jeweils über diesem jeweiligen Strahlparameter zur spezifischen Massenstromdichte $C_{s,sp}$ und Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen aufgetragen und statistisch ausgewertet. In diesem Zusammenhang wurden auch die verschiedenen Strahlvarianten im Hinblick auf ihrer Effektivität und Effizienz durch die rechnerischen Größen "Flächenratio" ξ_{ae} und "Abtragseffizienz" $E_{s,ve}$ verglichen (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**).

Um herauszufinden, welche die relevanten Einflussparameter (vgl. **Bild 3.6.**) bei der auf die Produkt- und Erdmaterialeigenschaften angepassten Prozessoptimierung sind, wurden Regressionsanalysen unter Verwendung von SPSS durchgeführt. Die graphischen Darstellungen liefern wichtige Informationen über die funktionellen Zusammenhänge der relevanten Prozessparameter beim Materialabtragen im Reinigungsprozess.

Besonders großes Augenmerk wurde, insbesondere für den Einsatz der Strahlen zur Gemüsewäsche, auf die Reinigungs- sowie Beschädigungspotentiale der Strahlen gerichtet.

Für die effektive und Gemüse schonende Reinigung muss der Strahl eine definierte spezifische Druckbelastung zur Verfügung stellen, um ein präzises Abtragen des an der Gemüsoberfläche anhaftenden Erdmaterials zu ermöglichen. Aus den Versuchen zur Ermittlung der Reinigungseffektivität und Abschätzung des Beschädigungspotentials am Gemüse wurden

folgende 3 **Klassen zur Strahlwirkung** festgelegt, die sich aus der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen ableiten lassen:

1. unwirksam
2. optimal
3. schädigend

Für die Gemüsearten wurden optimale Variationsbereiche der Strahlstrukturdaten ($C_{s,sp,h=f(z)}$ und $I_{s,sp,h=f(z)}$) ermittelt. Die während dieser Untersuchung gewonnenen Daten wurden als zusätzliche Informationen ergänzend in Diagramme aufgenommen.

Durch die kombinierte Darstellung wurden die optimalen Düsen- und Betriebsparameter für den individuellen Anwendungsfall bestimmt, insbesondere für die Prozessoptimierung der Gemüsereinigung.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Versuchsergebnisse werden in ihrer Darstellung unterteilt in:

- grundlegende Betrachtung der funktionellen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern im Materialabtragsprozess mittels Wasserstrahlen unter Variation bestimmter Inputparameter (**Abschnitt 5.1**) und
- Reinigungsanalyse in Bezug des am Gemüse anhaftenden Erdmaterials unter Berücksichtigung des Schädigungspotentials der Strahlen am Frischgemüse (**Abschnitt 5.2**).

5.1 Funktionelle Zusammenhänge der Parameter im Abtragsprozess

In den folgenden Darstellungen von funktionellen Zusammenhängen beim Materialabtragen werden Wasserstrahlen unterschiedlicher Eigenschaften zu den Betrachtungen herangezogen, mit denen die Einflüsse der variierbaren Inputparameter entsprechend ihrer Variationsbereiche aus **Tabelle 4.2** untersucht und graphisch gegenübergestellt werden.

Schwerpunktmäßig beschränkt sich die Analyse der Zusammenhänge auf die Anwendung der über die Strahlflächen A_s integrierten Mittelwerte der Strahlstrukturparameter. Die Strahlflächen A_s der jeweiligen Versuchsreihen sind unter Zuhilfenahme der Messungen der Strahlverteilungsbreiten $b_{s,i}$ und aus der Zusammenstellung der Streulichtmessungen in der entsprechenden Messebene ermittelt worden (vgl. **Abschnitt 4.2.3.1**).

Im **Anhang B** sind die mittleren Strukturparameter der ausgebildeten Strahlen mittels der Spritzdüsen (vgl. **Tabelle 4.1**) in Variation bestimmter Betriebsparameter der Düsen E1 bis E7 zu entnehmen.

Die Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen den Betriebsparametern und der Strahlaufbildung sowie der Strahlaufprallwirkung werden beispielhaft an zwei Niederdruckdüsen unterschiedlicher Durchmesser d_d mit 0,75 mm (E1) und 1,7 mm (E4) dargestellt und diskutiert.

5.1.1 Strahleigenschaften bei variierenden Inputparametern

5.1.1.1 Düsendurchmesser

Bild 5.1 illustriert exemplarisch für verschiedene Versuchsreihen die Flüssigkeitsverteilungen der Strahlen innerhalb ihrer Ausbreitungsflächen, angegeben durch die spezifische Volumendichte $V_{s,sp,h=10}$ des Strahls.

Die verschiedenen Strahlparameter, die aus den Messungen der Strahlverteilung extrahiert wurden, sind in Abhängigkeit der Inputparameter Arbeitsabstand h_a und Spritzdruck p in **Tabelle 5.1** dargestellt.

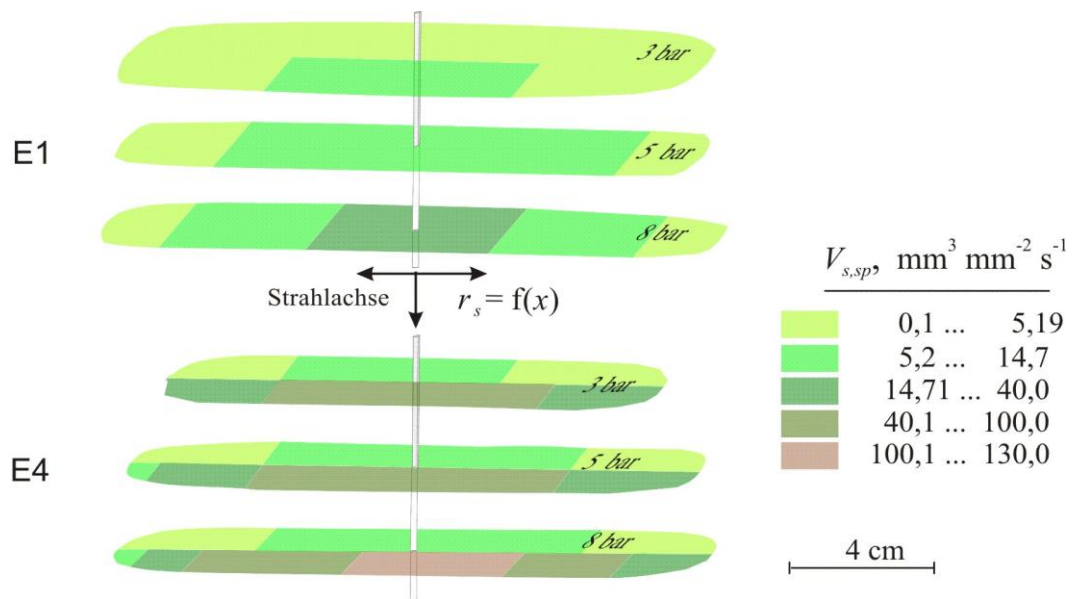


Bild 5.1 Verteilung der mittleren $V_{s,sp,h=f(z)}$ als Funktion des Spritzdruckes p für Strahlen in 10 cm Strahllänge h_s für E1 und E4

Tabelle 5.1 Veränderungen der Strahlgeometrie und der mittleren $C_{s,sp}$ in Abhängigkeit der variierbaren Inputparameter, h_a und p

Strahlvariante	Mittelwerte der Strahlstrukturparameter				
	$b_{s,1}$ cm	θ_s Grad	$b_{s,2}$ cm	A_s cm^2	$C_{s,sp}$ $\text{mg mm}^{-2} \text{s}^{-1}$
E1_13	22,4	96,4	4,8	71,9	1,8
E1_15	25,6	104,0	1,6	41,0	3,4
E1_18	27,2	107,3	1,6	43,6	3,5
E4_13	19,2	87,6	1,6	30,4	32,4
E4_15	22,4	96,4	1,6	35,3	40,2
E4_18	24,0	96,4	1,6	37,2	46,1
E1_23	41,6	92,2	8,0	314,9	0,4
E1_25	48,0	100,3	4,8	216,6	0,6
E1_28	49,6	102,2	4,8	223,8	0,7
E4_23	35,4	83,0	3,2	94,7	10,0
E4_25	37,6	86,4	3,2	101,3	13,2
E4_28	39,2	88,8	3,2	109,7	13,3

Bei beiden hier verglichenen Düsen handelt es sich um 90°-Flachstrahldüsen, wobei die Industriedüse E4 in etwa die 5fache Volumenstromrate Q als die Agrardüse E1 aufweist.

Während sich für die E1 beispielsweise bei einem p von 3,0 bar eine größere $b_{s,1,h=10}$, in Höhe von 22,4 cm bestimmen lässt, fällt sie für die E4 mit ca. 19,2 cm wesentlich geringer aus. Bei der E1 und den untersuchten p liegen die $A_{s,h=10}$ ca. 1,2- bis 2fach höher als die bei der E4. Die Größe der $A_{s,h=20}$ beträgt für die E1 sogar etwa das 2- bis 3fache von E4. Daraus ergaben sich entsprechend der Wasserverbrauchskennlinien der Düsen auf p - Q -Diagrammen deutliche Unterschiede in der mittleren Massenstromdichte $C_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen.

Durch den Einsatz der E4 anstatt der E1 verschiebt sich das Verhältnis der Strahlzonen entsprechend **Bild 3.4** von einem nahezu zerfallenden Einzeltropfenstrahl hin zu einem kompakten und zusammenhängenden Strahl. Demzufolge wurde für die E4 unter den untersuchten p eine mittlere $C_{s,sp,h=10}$ vom 12- bis 18fachen von E1 bestimmt. Zu erkennen ist auch, dass bei einer Verdopplung der h_s auf 20 cm die Dichteabnahme für die E4 deutlich geringer ausfällt als für die E1. Demnach lässt sich für die E4 eine 19- bis 25fach höhere $C_{s,sp,h=20}$ in Abhängigkeit der hier untersuchten Spritzdrücken p gegenüber der E1 ermitteln.

Erklärbar wird der Unterschied der Strahleigenschaften zwischen diesen Düsen, wie in **Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2** beschrieben, mit dem unterschiedlichen Ausmaß der Strahl-turbulenz und der Strahlinstabilität am Strahlausgang der Düsen.

Bei E1 mit dem verringerten Düsendurchmesser d_d und damit geringen Q liegt beim Strahlaustritt eine gesteigerte hohe Strahl-turbulenz vor. Dadurch zeichnet sich der Strahl durch einen vergrößerten Strahlwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ mit einhergehender Reduktion der $V_{s,sp}$ sowie der $C_{s,sp}$ ab. Bei den höheren radialen Strahlgeschwindigkeiten dominieren die hydrodynamischen Kräfte, so dass sich eine turbulenzinduzierte Strahlstruktur ausbildet. Diese Struktur basiert auf der Deformation, dem Zerfall der gebildeten Tropfenstrahlen. Diese Phänomene spiegeln sich neben der vergrößerten Strahlausbreitung auch in verringerten mittleren d_{32} wider.

Durch den Einsatz von E4 mit dem größeren d_d nimmt die Divergenz der Strahlen aufgrund ihrer geminderten Turbulenz und Instabilität am Düsenausgang ab. Die sich daraus ergebende Strahlkohärenz ist mit einer verminderten Wirkung der hydrodynamischen Kräfte verbunden, so dass eine Verschiebung des Schwerpunktes der Tropfengrößenverteilung hin zu größeren Tropfen zu beobachten ist.

In **Bild 5.2** wird der Einfluss des größeren Düsendurchmessers d_d in der Änderung der mittleren Tropfengrößen-Verteilungsdichte q_3 besonders anschaulich.

Bei der Anwendung von E1 und den hier eingesetzten p liegt ein deutlich höherer Strahl-Volumenanteil der Kleintropfen in $h_s = 10$ cm (bis 64% vom gesamten Strahlvolumen) vor. Mit dem Einsatz der E4 wurden dagegen deutlich weniger Kleintropfen (bis 18% des gesamten Strahlvolumens) registriert.

Tabelle 5.2 veranschaulicht die Änderung des mittleren d_{32} sowie der mittleren v_t der erhaltenen Tropfenverteilungen bei beiden Düsen unter Variation der Betriebsparameter p und h_s .

Daraus wird ersichtlich, dass die Erhöhung des d_d eine Vergrößerung der d_{32} hervorruft.

Vergleicht man die v_t zwischen den Düsen unter gleichen Spritzbedingungen, so ist eine geringfügige Veränderung der mittleren v_t zu beobachten. Durch den Einsatz von E4 statt E1 ist bei den untersuchten Drücken p eine Zunahme der $v_{t,h=10}$ bis zu 4 m s^{-1} zu verzeichnen.

Der Unterschied in v_t steigt bei $h_s = 20 \text{ cm}$ jedoch mit 5 bis 9 m s^{-1} deutlicher.

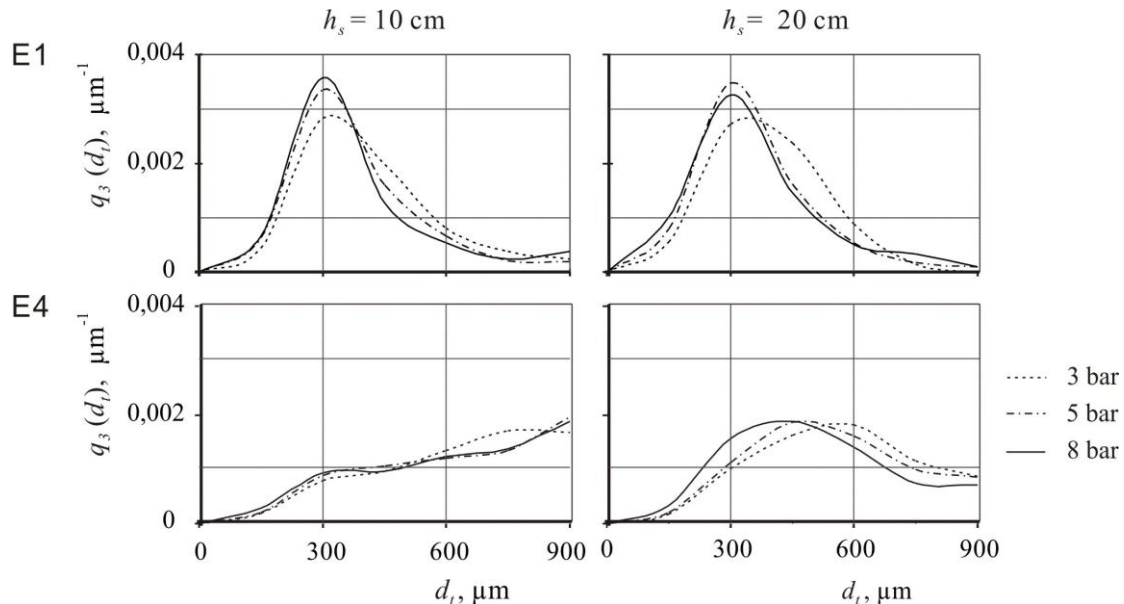


Bild 5.2 Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ der Tropfenspektren der Wasserstrahlen bei Verwendung von E1 und E4 unter Variation des Druckes p und der Strahllänge h_s

Tabelle 5.2 Veränderungen der mittleren d_{32} und v_t der Tropfengrößenverteilungen bei E1 und E4 unter variierenden Inputparametern, p und h_s

Strahlvariante	$d_{32}, \mu\text{m}$			$v_t, \text{m s}^{-1}$		
	p, bar			p, bar		
	3	5	8	3	5	8
E1_1	277	256	251	13,6	19,6	24,3
E4_1	418	407	391	18,1	23,1	27,7
E1_2	266	239	230	11,2	16,2	16,4
E4_2	375	361	319	17,7	22,4	25,8

5.1.1.2. Betriebsparameter

Arbeitsabstand von 10 und 20 cm

Die Veränderungen der Strahleigenschaften in Abhängigkeit der Strahllänge h_s sind entsprechend des Düsendurchmessers d_d unterschiedlich.

Bei der Verdopplung der h_s kommt es bei gleichen Spritzbedingungen zur 3- bis 5fachen Vergrößerung der Strahlfläche $A_{s,h=20}$ gegenüber der $A_{s,h=10}$ (**Tabelle 5.1**).

Demzufolge ist eine entsprechende Veränderung in der mittleren Volumenstromdichte $V_{s,sp}$ des Strahls zu verzeichnen. Beispielsweise bei einem p von 3 bar erzeugen die Düsen Strahlen mit einer mittleren Massenstromdichte $C_{s,sp,h=10}$ der wirksamen Tropfen von 1,8 (E1) sowie $32,4 \text{ mg mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (E4). Durch die Abstandsverdopplung sinkt die mittlere $C_{s,sp,h=20}$ auf 0,4

(E1) bzw. $10 \text{ mg mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (E4). Dies bedeutet eine Abnahme der Werte auf 1/5 (E1) bzw. 1/3 (E4) der Mittelwerte der $C_{s,sp,h=10}$.

Wie der Variation der mittleren Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ aus **Bild 5.2** zu entnehmen ist, verschiebt sich bei gleichen Spritzbedingungen der Schwerpunkt der Tropfengrößenverteilungen mit Verdopplung der Strahllänge h_s von 10 auf 20 cm in Richtung kleinerer Tropfen. Folglich sinken die mittleren d_{32} , was anhand der in **Abschnitt 4.1.1** und **Abschnitt 4.1.2** vorgestellten Theorien wie folgt erläutert werden kann:

Einhergehend mit der Abstandsverdopplung kommt es zu einer größeren radialen Strahlaufweitung, die sich in einer verstärkten Abnahme der $V_{s,sp}$ sowie $C_{s,sp}$ bemerkbar macht. Gleichzeitig verstärkt sich die zur Strahlachse hin anwachsende Vermischungszone und folglich der Effekt der aerodynamischen Kräfte, die mit den Strahlfragmenten und Tropfen in Wechselwirkung treten. Als Resultat der wirkenden Kräfte ergibt sich unter den hier untersuchten Spritzbedingungen jedoch nur eine geringe Abnahme der mittleren d_{32} der Tropfenverteilungen. Demzufolge ist bei den angewandten p ein Rückgang des mittleren d_{32} bis 8% für E1 sowie bis 18% für E4 gegenüber dem d_{32} bei 10 cm h_s zu beobachten.

Der Einfluss der Abstandsverdopplung auf die Tropfengeschwindigkeit v_t hat bei beiden Düsen unterschiedliche Auswirkungen (vgl. **Tabelle 5.2**). Durch die Anwendung von E4 und die sich daraus ergebende höhere Strahlkonzentration in 10 cm h_s dominieren die interpartikulären Wechselwirkungen, da der Abstand zwischen den Strahlsegmenten und Tropfen kleiner wird. Im Fall des Einsatzes von E1 ist durch die Abstandsverdopplung ein Rückgang der v_t zwischen 2 bis 8 m s^{-1} zu verzeichnen. Die starke Abnahme der v_t wird hier durch den hohen prozentuellen Volumenanteil der kleinen Tropfen bestimmt, da diese Tropfen aufgrund des Luftwiderstandes wesentlich abgebremst werden. Im Gegensatz zur E1 sinkt die v_t für E4 mit Erhöhung der h_s von 10 cm auf 20 cm nur geringfügig zwischen 0,4 bis $1,9 \text{ m s}^{-1}$. Wie in **Abschnitt 3.2.1** und **Abschnitt 3.2.2** erläutert, ist die Wechselwirkung mit der Umgebungsluft aufgrund des kompakten zusammenhängenden Strahls der E4 im Nahbereich geringer als die der E1. Die bei 20 cm h_s zu beobachtende geringe Abnahme der v_t beruht scheinbar auf dem reduzierten Luftreibungseffekt, welcher im Prinzip eine Senkung der v_t verursacht.

Spritzdruck und Volumenstromrate

Eine Erhöhung des p hat zwei konträre Phänomene der Strahlausbildung zur Folge.

Die Strahlströme aus Düsenausgängen weisen einerseits wegen der relativ großen Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_s eine hohe Re auf, mithin erfolgt die Ausbreitung in der Atmosphäre in Form eines turbulenten Strahls. Der Vergleich der Daten der Strahlgeometrie in Abhängigkeit vom p zeigt (vgl. **Bild 5.1**), dass sich die A_s nicht wesentlich ändern, abgesehen von Strahlen der E1 unter dem niedrigen p von 3 bar, welche eine größere $b_{s,2}$ aufweisen.

Untere Grenzwerte für die hier erfassten Austrittsdaten sind bei den Strahlströmungen etwa eine v_t von 15 m s^{-1} und ein d_d von 0,75 mm (E1), entsprechend einer Re von ca. 10^7 . Diese hohen und mit dem p ansteigenden Re bewirken entsprechend **Bild 3.2** eine Erhöhung des Anteiles an kleinen Tropfen (vgl. **Abschnitt 3.2.1**, **Gleichung 3.1** und **Gleichung 3.2**).

Aus **Bild 5.2** ist eine geringe Verschiebung des Schwerpunktes der Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ in Richtung kleinerer Tropfen mit Steigerung des p sichtbar. Dies bedeutet, mit Erhöhung des p sind mehr kleinere Tropfen bzw. abnehmende Anteile an mittelgroßen und großen Tropfen registriert worden. Daraus resultiert eine Abnahme des d_{32} .

Nach **Tabelle 5.2** bringt die Zunahme des p von 3 auf 8 bar bei 10 cm h_s eine Verringerung des d_{32} bis zu ca. 9% (E1) bzw. 6% (E4). Bei $h_s = 20$ cm reduzieren sich dadurch die Werte des d_{32} bei Druckerhöhung auf 8 bar bis etwa 13% (E1) bzw. 15% (E4).

Andererseits steigen bei Erhöhung des p mit einhergehender Vergrößerung der Q die Strahlvolumenanteile pro Flächeneinheit $V_{s,sp}$ (vgl. **Bild 5.1**).

Vergleicht man die Flüssigkeitsverteilungen über die A_s bei Steigerung des p von 3 auf 8 bar, so ergibt sich für die E1 eine 2,4- bis 2,8mal und für E4 eine 1,5- bis 1,6mal höhere Volumenstromdichte $V_{s,sp}$ der Strahlen in den hier untersuchten h_s . Aus den sowohl durchmessergeringernden als auch durchmessergrößernden Effekten der Spritzdruckanhebung resultiert eine Änderung der $C_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen dahingehend, dass die mittlere $C_{s,sp}$ mit Anhebung des p von 3 auf 5 und 8 bar linear aber nicht progressiv ansteigt (vgl. **Tabelle 5.1**). Der Unterschied der mittleren Massenstromdichte $C_{s,sp}$ in beiden h_s ist durch Anhebung des p von 3 auf 5 bar mit einer für E1 1,8fachen und für E4 1,3fachen maximalen Erhöhung stärker ausgeprägt. Der Anstieg der mittleren $C_{s,sp}$ durch weitere Anhebung des p auf 8 bar ist hingegen mit ca. 1,1facher Erhöhung schwach.

Ein weiterer charakteristischer Effekt der Druckerhöhung ist der deutliche Anstieg der Tropfengeschwindigkeit $v_{t,h=f(z)}$ (vgl. **Tabelle 5.2**). Die Geschwindigkeitswerte zeigen eine stärker ausgeprägte Spritzdruckabhängigkeit als eine Düsendurchmesserabhängigkeit.

Die $v_{t,h=10}$ bei einem p von 3 bar beträgt etwa 14,3 (E1) bzw. 17,5 m s⁻¹ (E4). Die Anhebung des p auf 8 bar ruft eine gesteigerte $v_{t,h=10}$ von 25,1 für E1 bzw. 22,9 m s⁻¹ für E4 hervor. Bei der E1 und entsprechender Druckanhebung ist in Strahllänge $h_s = 20$ cm die Steigerung der v_t mit 5 m s⁻¹ wesentlich geringer. Sie liegt bei der E4 hingegen mit 8 m s⁻¹ höher, da bei erhöhter h_s von 20 cm mit einhergehender Verschiebung der Strahldichte die Anhebung des p offensichtlich in relativ starker Form in Strahlgeschwindigkeit v_s umgesetzt wird. Bei höherem p von 8 bar ist aufgrund der erhöhten Kleintropfenanteile, insbesondere bei 20 cm h_s , der Effekt des geringeren Anstiegs von v_t deutlich zu erkennen.

5.1.2 Untersuchung zum Materialabtrag durch Wasserstrahlen

Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtung liegt in der Analyse der erzielten Abtragsresultate und der Ermittlung der Abtragseffektivität der Strahlen, die durch Variation bestimmter Inputparameter ausgebildet worden sind. Für den maximalen Materialabtrag auf den Sand-Bindemittelgemisch-Platten muss der Strahl nach **Abschnitt 3.2.4** eine ausreichend hohe spezifische Druckenergie zur Verfügung stellen. Das heißt, für das abzutragende Material müssen günstige Belastungszustände durch die geeignete Ausbildung der Strahlen mit optimaler Überlagerung von statischen und dynamischen Anteilen im Strahlquerschnitt vorliegen. Demzufolge ist zu untersuchen, mit welcher Einstellung der verschiedenen Prozessparameter

der Materialabtrag mittels Wasserstrahlen am wirksamsten ist.

5.1.2.1 Energetische Betrachtung der Strahlen

Unter Zugrundelegung der ermittelten Größen- und Geschwindigkeitswerte der Tropfenverteilungen wurde zunächst das mittlere Impulspotential I_t der Einzeltropfenklasse nach **Gleichung 4.1** betrachtet.

Nach **Abschnitt 3.2.3** geben die spezifische Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$ der auf kleiner Materialfläche aufschlagenden wirksamen Tropfen und deren Verteilung über die Strahlfläche A_s Aufschluss über die auf das Material wirkende spezifische Strahldruckbelastung.

Vergleicht man das mittlere Impulspotential I_t sowie die mittlere $I_{s,sp,h=f(z)}$ der wirksamen Einzeltropfenklasse aller Versuchsreihen miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

Für die Strahlen der beiden Düsen unter konstanten Spritzbedingungen liegen keine signifikanten Unterschiede der mittleren I_t gleicher Tropfengrößenklassen vor (**Bild 5.3**). Das heißt, der Düsendurchmesser d_d beeinflusst das Impulspotential I_t technisch nicht entscheidend. Es sei erwähnt, dass bei E4 die I_t bei $h_s = 20$ cm gegenüber $h_s = 10$ cm leicht ansteigen, während die der E1 unter gleichen Spritzbedingungen abnehmen.

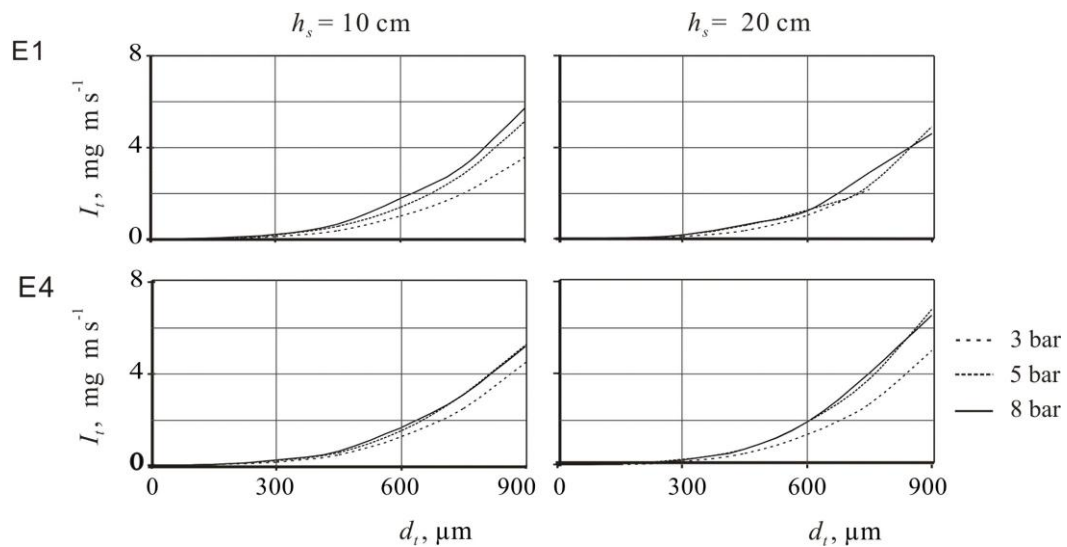


Bild 5.3 Darstellung des mittleren I_t über die mittleren Größenverteilungen der Tropfenstrahlen in Abhängigkeit von h_s und p unter Anwendung von E1 und E4

Durch die Variation des p bei gleichem Düsendurchmesser d_d und h_s sind hingegen Unterschiede im Verlauf des I_t über Tropfendurchmesser d_t sichtbar.

Wird die $I_{s,sp}$ der Strahlen bei Variation der Düsen- und Betriebsparameter betrachtet, so zeichnen sich die Strahlen von E4 durch eine wesentlich höhere $I_{s,sp}$ aus.

Die mittleren $I_{s,sp,h=10}$ der E4 ist bei Erhöhung des p von 3 auf 5 und 8 bar 23-, 13- und 12mal höher im Vergleich zu den der E1 (**Bild 5.4**). Noch deutlicher ist der Unterschied bei $h_s = 20$ cm. Die Anhebung des p äußert sich in einer steigenden $I_{s,sp}$, da sie neben einer Erhöhung der v_t auch mit einer Zunahme des Q verbunden ist. Beispielsweise steigt mit einer Druckerhöhung von 3 auf 5 bar die mittlere $I_{s,sp}$ der Strahlen in h_s von 10 und 20 cm auf das 1,6- bzw.

1,7fache (E4) und auf das 2,8- bzw. 2,3fache (E1). Eine weitere Anhebung von 5 auf 8 bar führt bedingt durch die Abnahme der mittleren d_{32} mit Erhöhung des p (**Abschnitt 3.2.1, Gleichung 3.2**) nicht zur progressiven Steigerung der $I_{s,sp}$. Hier ist ein Anstieg der $I_{s,sp}$ nur um das 1,1fache (E4) bzw. 1,2fache (E1) zu verzeichnen.

Zu erkennen ist auch, dass bei E1 der Anstieg der $I_{s,sp}$ mit Anhebung des p stärker ausfällt als bei der E4. Nach **Abschnitt 3.2.2** könnten diese auftretenden Abweichungen auf die Dominanz der Tropfeninteraktion (Tropfenkollision und Koaleszenz) durch die erhöhte Strahldichte bei E4 zurückzuführen sein.

Nach Betrachtung von **Bild 5.3** macht sich die Anhebung der h_s von 10 auf 20 cm bei der Veränderung des I_t der einzelnen Tropfenklassen nicht signifikant bemerkbar. Mit dieser Abstandsverdopplung ist jedoch der Strahlparameter $I_{s,sp}$ zu kleineren Werten hin verschoben, welche sich durch die Strahlausbreitung mit einhergehender, sich aus der **Gleichung 4.2** ergebenden Reduktion der mittleren Massenstromdichte $C_{s,sp}$ des Strahls deuten lässt.

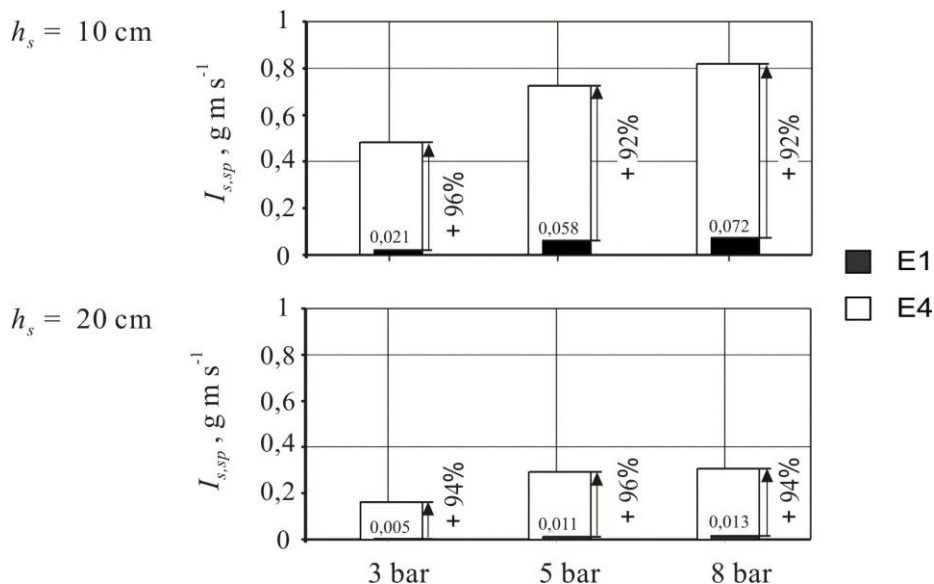


Bild 5.4 Veränderung der mittleren $I_{s,sp}$ der Wasserstrahlen bei E1 und E4 unter Variation des p und h_s (vgl. **Anhang B, Tabelle B1, B2 und B3**)

Aus den hydrodynamischen Zusammenhängen lässt sich schließen (vgl. **Bild 5.4**), dass bei konstantem p von 3 bar die mit dem d_d um 5fach vergrößerte Rate Q eine wesentlich deutlichere Erhöhung der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen hervorrufen wird als durch die Anhebung des p um 5 bar bei gleichem d_d .

5.1.2.2. Wirkungs- und Abtragsanalyse

Wie bereits in **Abschnitt 4.2.2.1.3** und **Abschnitt 4.2.2.1.4** vorgestellt, wurden als Maß der Strahlenanalyse die spezifische Verteilung des P_{max} und der Abtragstiefe t_a über die entsprechenden Strahlflächen A_s herangezogen. In den hier durchgeführten Abtragsversuchen wird zunächst die gesamte Abtragsfläche A_a bei der Strahlcharakterisierung berücksichtigt, die sich als Resultat aus der spezifischen Materialbelastung der Stoß- und Staudruckanteile des Strahls sowie der oberflächigen Erosion der radial abströmenden Strahlflüssigkeit ergibt.

Aus den Messdaten der Wirkungs- und Abtragsversuche wurden weitere Strahlkenngrößen errechnet, wie Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ und Flächenratio ξ_{ae} (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**), die eine Bewertung der Strahlen bezüglich ihrer Leistung $e_{s,h=0}$, Effektivität und Effizienz zulassen.

Maximalaufpralldruck

Bild 5.5 zeigt Beispiele der gemessenen Verteilungen des Maximalaufpralldruckes P_{max} auf der Strahldruckfläche A_p in einem Arbeitsabstand $h_a = 10$ cm.

In **Tabelle 5.3** sind die ermittelten A_p und die über diese Flächen integrierten mittleren P_{max} der Strahldruckverteilungen dargestellt, zusätzlich zu den Angaben der Flächenratio ξ_p .

Die Darstellungen in **Bild 5.1** und **Bild 5.5** verdeutlichen, dass die P_{max} mit zunehmender Volumen- $V_{s,sp}$ und Massenstromdichte $C_{s,sp}$ der Strahlen ansteigen. Beispielsweise wurde bei den 12- bis 18mal höheren $C_{s,sp}$ für die Strahlen der E4 mit 3, 5 und 8 bar Spritzdruck p ein 2,4- bis 2,8fach höherer P_{max} als für die von E1 bestimmt (vgl. **Anhang B, Tabelle B1**).

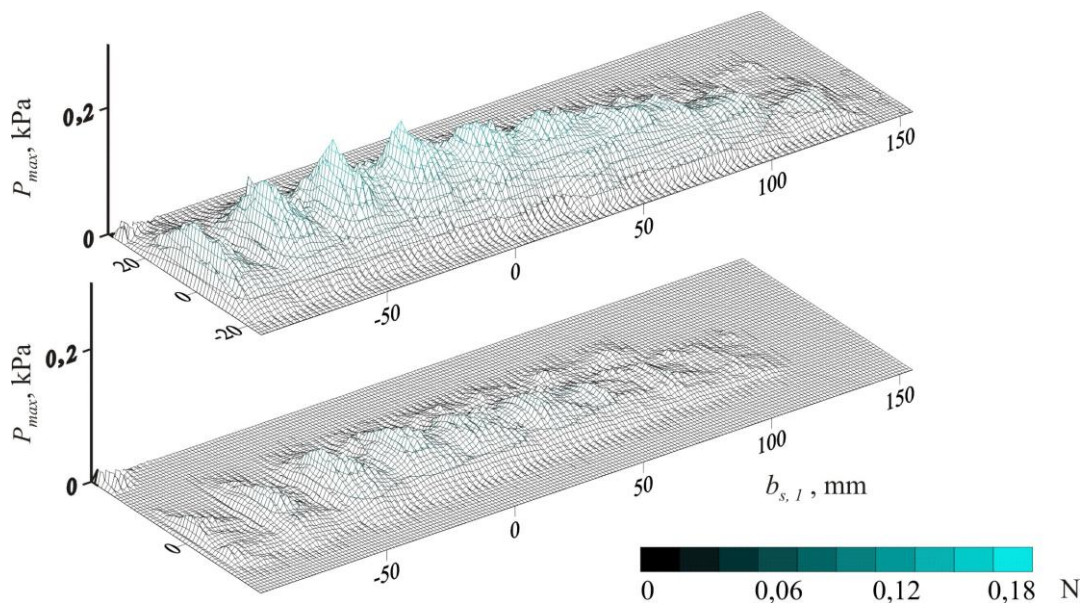


Bild 5.5 Verteilungen der P_{max} bzw. der gemessenen pixelflächenbezogenen F_{max} der Wasserstrahlen bei $p = 3$ bar und $h_a = 10$ cm für E1 (unten) und für E4 (oben)

Die Variation des p bei gleichem d_d macht sich im Verlauf der mittleren P_{max} bemerkbar. Die Steigerung des p geht mit einem linearen Anstieg der $P_{max,h=10}$ einher (**Tabelle 5.3**).

Die Anhebung des h_a auf 20 cm führt, wie erwartet, zu kleineren Mittelwerten der P_{max} abgesehen vom mit E4 bei einem konstanten p von 3 bar gebildeten Strahl, bei dem trotz der um 3,2fach verringerten $C_{s,sp}$ ein leichter Anstieg des P_{max} zu beobachten ist. Diese Zunahme beruht offensichtlich auf dem sinkenden Ausmaß der gegenseitigen Beeinflussung einzelner Strahlfragmente und Tropfen aufgrund abnehmender Strahldichte durch die Strahlausbreitung. Bei weiter steigendem p auf 5 und 8 bar ist jedoch die Steigerung der $I_{s,sp}$ durch den zur Strahlachse hin stark ausgeprägten Tropfenzerfall wegen der gesteigerten hydro- und aerodynamischen Kräfte kompensiert. Demnach ist bei einem p von 8 bar der $P_{max,h=20}$ des Wasserstrahls etwa um den Faktor 0,7 für E1 und 0,3 für E4 kleiner als der $P_{max,h=10}$.

Tabelle 5.3 Veränderungen in der Aufprallwirkung der Wasserstrahlen mit E1 und E4 unter Variation bestimmter Inputparameter, p und h_a

Strahlvariante	A_P , cm ²	P_{max} , kPa	ξ_P , —
E1_13	69,4	10,0	1,0
E1_15	91,2	13,3	2,2
E1_18	68,4	18,4	1,6
E4_13	100,8	24,3	3,3
E4_15	98,9	32,0	3,0
E4_18	103,8	51,6	2,9
E1_23	88,8	8,9	0,3
E1_25	107,8	12,7	0,5
E1_28	34,2	4,7	0,2
E4_23	158,1	27,3	1,7
E4_25	196,3	30,4	1,9
E4_28	130,7	34,3	1,2

Bei dem Vergleich der Regressionsfunktionen für h_a von 10 cm und 20 cm miteinander ist zu beobachten (vgl. **Anhang B, Bild B2**), dass sich bei $h_a = 20$ cm ein stetiger, monoton steigender linearer Verlauf des P_{max} über der $I_{s,sp}$ verzeichnen lässt. Dagegen kehrt sich bei $h_a = 10$ cm der Verlauf der Trendlinie im Bereich $0,2 \leq I_{s,sp} \leq 0,8$ g m s⁻¹ in ein nahezu konstantes, bis leicht steigendes Verhalten um. Danach steigt P_{max} wieder linear an. Der sich konstant einstellende Druckverlauf ist zurückzuführen auf die erhöhten strahlinternen Reibungs- bzw. Dämpfungseffekte sowie die Strahlinterventionen beim Aufprall, da mit der Erhöhung des d_d der Abstand zwischen den Tropfen und Strahlsegmenten kleiner wird. Der Effekt kann durch eine Steigerung des p kompensiert werden.

Bei Anhebung des h_a wird sich der Anfangspunkt des konstanten Maximaldruckverlaufs verschieben, so dass die $I_{s,sp}$ des Anfangspunktes von der spezifischen Strahldichte, insbesondere von der Tropfengrößenverteilung pro Flächeneinheit abhängig ist. Außerdem ist zu entnehmen, dass bei einem vorgegebenen d_d die Aufpralldruckeinbuße bei Abstandsanhebung durch Spritzdruckerhöhung kompensiert werden muss. Bei dem Vergleich der Mittelwerte von P_{max} und $I_{s,sp}$ der beiden h_a entspricht P_{max} bei E4 beispielsweise bei 20 cm h_a und $p = 8$ bar dem P_{max} bei $h_a = 10$ cm und $p = 5$ bar (vgl. **Tabelle 5.3**). Dennoch weist die Strahlvariante E4_28 eine 0,6fach niedrigere mittlere $I_{s,sp}$ als die E4_15 auf.

Nach den ermittelten Werten der Flächenratio $\xi_{P,h=10}$ liegt eine größere A_P als die unter denselben Spritzbedingungen erzielte Strahlflächen A_s vor, was vornehmlich auf die niedrig angegebenen Werte der Spritztiefe $b_{s,2}$ der Strahlfläche A_s zurückzuführen ist. Die Abstandserhöhung von 10 auf 20 cm bei E1 macht sich deutlicher durch abnehmende Werte der Flächenratio ξ_P bemerkbar als bei E4 (vgl. **Tabelle 5.3**).

Erklärbar wird dieser stärkere Wirkungsverlust der Strahlen nach **Bild 3.3** mit einer verstärkten Bildung einer Nebelzone am Strahlrand, die mit der Anhebung des Arbeitsabstands h_a zur Strahlachse hin anwächst (vgl. **Abschnitt 3.3.2**).

Materialabtrag

Bild 5.6 stellt exemplarisch die durch Strahlen bei einem 10 cm Arbeitsabstand h_a und 3 bar Druck p auf den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten erzielten Verteilungen der Abtragstiefe t_a der beiden Niederdruckdüsen dar.

In **Bild 5.7** sind die unterschiedlichen Abtragsflächen A_a auf den Standardtestkörper durch Strahlen der E1 und E4 unter Variation des p und bei Verdopplung des h_a auf 20 cm gegenübergestellt.

Vergleicht man den Einfluss des p auf die Abtragsdaten der Düsen bei den zwei Arbeitsabständen h_a miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

Mit E1 kommt es, wie in **Abschnitt 5.1.1.1** erläutert, zur deutlichen Divergenz der Strahlen, die sich bei einem h_a von 10 cm in einer großflächigen, aber oberflächennahen, Materialabtragung bemerkbar macht (**Bild 5.6**).

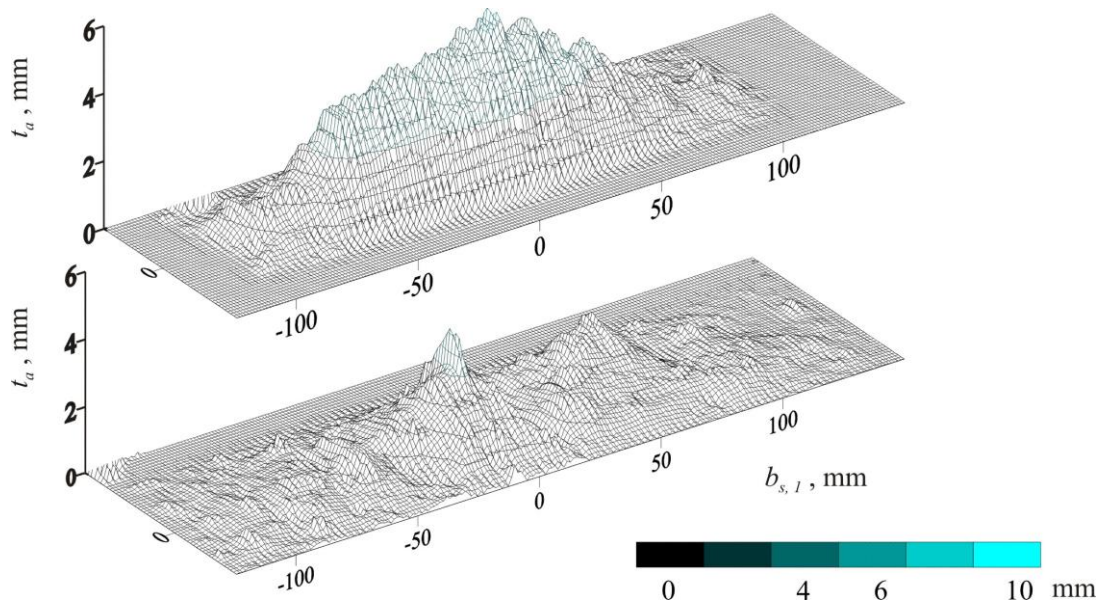


Bild 5.6 Verteilungen der t_a durch Wasserstrahlen bei $p = 3 \text{ bar}$ und $h_a = 10 \text{ cm}$ für E1 (unten, E1_13) und E4 (oben, E4_13)

Bei Betrachtung von **Bild 5.7** wird jedoch deutlich, dass es trotz der höheren Spritzbreite $b_{s, l, h=10}$ der Strahlen mit E1 zu keiner kennzeichnenden Steigerung der Strahlfläche A_a gegenüber der E4 kommt. Dies ist auf die für den Zerfall vorteilhafte Strahldivergenz und die daraus resultierende Abnahme der senkrecht zum abzutragenden Material wirkenden Belastungskomponente sowie auf die geringere spezifische Strahldichte zurückzuführen.

Dementsprechend weisen die Strahlen eine deutlich geringere spezifische Impulsintensität $I_{s, sp}$ der auf eine kleine Materialfläche auftreffenden wirksamen Tropfen pro Zeiteinheit auf. Dieses macht sich bei den Strahlen der E1 auch durch einen zur Strahlachse hin vergrößerten Verlust der Abtragungswirkung bemerkbar. Es findet überwiegend nur ein oberflächennahes Abtragen statt durch die tangential zur Materialfläche auftreffenden Tropfen und deren radial abströmende Flüssigkeit. Somit liegt die Flächenratio $\xi_{a, h=10}$ für Strahlen aller Versuchsreihen nach **Bild 5.8** über 0,8.

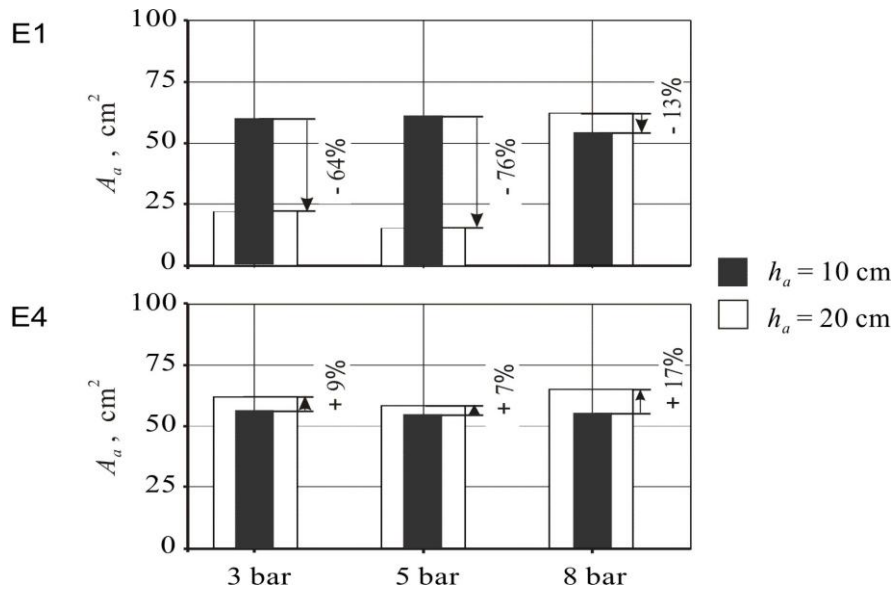


Bild 5.7 Veränderungen der mittleren A_a in Abhängigkeit der variierenden Inputparameter

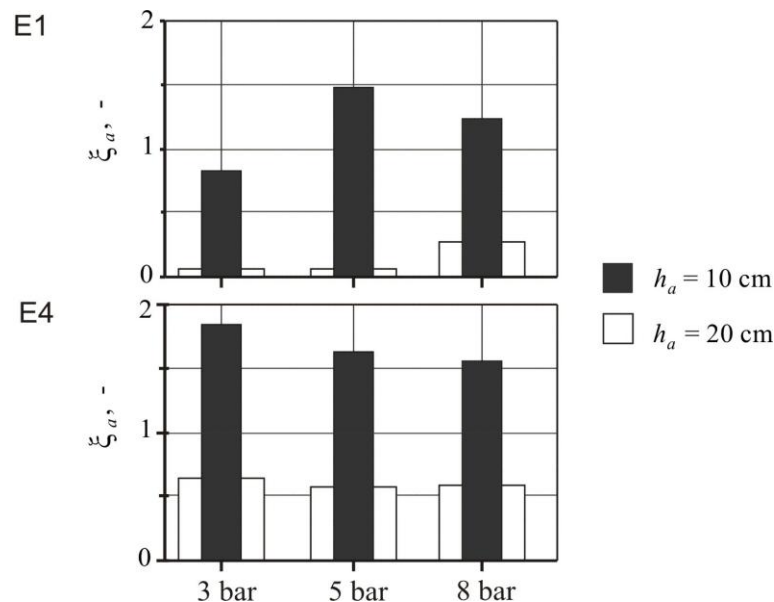


Bild 5.8 Veränderungen der Flächenratio ξ_a in Abhängigkeit der variierenden Inputparameter, p und h_a

Vergleicht man die Abtragstiefe t_a auf den Standardtestkörpern durch die Strahlen der beiden Düsen, so ist bei der Betrachtung von **Bild 5.9** zu erkennen, dass mit der Erhöhung der Q bei konstantem p die t_a deutlich ansteigt. Die Zunahme der t_a beruht auf einer sich aus der Strahl- ausbildung ergebenden verstärkten Impulsintensität $I_{s,sp}$ der Materialbeanspruchung. Durch Erhöhung der Volumenstromrate Q bei konstantem Druck p verschiebt sich die Belastungs- zone von einer einzeltropfenorientierten Beanspruchung durch die dünnen Strahlen der E1 hin zu einer durch den kompakten sowie zusammenhängenden Strahl geprägten Stoß- bzw. Stau- druckbelastung bei der E4.

Einhergehend mit Zunahme des d_d kommt es zu einem linearen Anstieg der $C_{s,sp}$ der wirksa- men Tropfen, der sich in einer erhöhten spezifischen Belastungsintensität und -höhe äußert.

Dieses spiegelt sich auch in der Steigerung der $t_{a,h=10}$ wider, die für E4 bei 3, 5 und 8 bar p mit 2- bis 4facher Erhöhung deutlicher ausfallen als für E1.

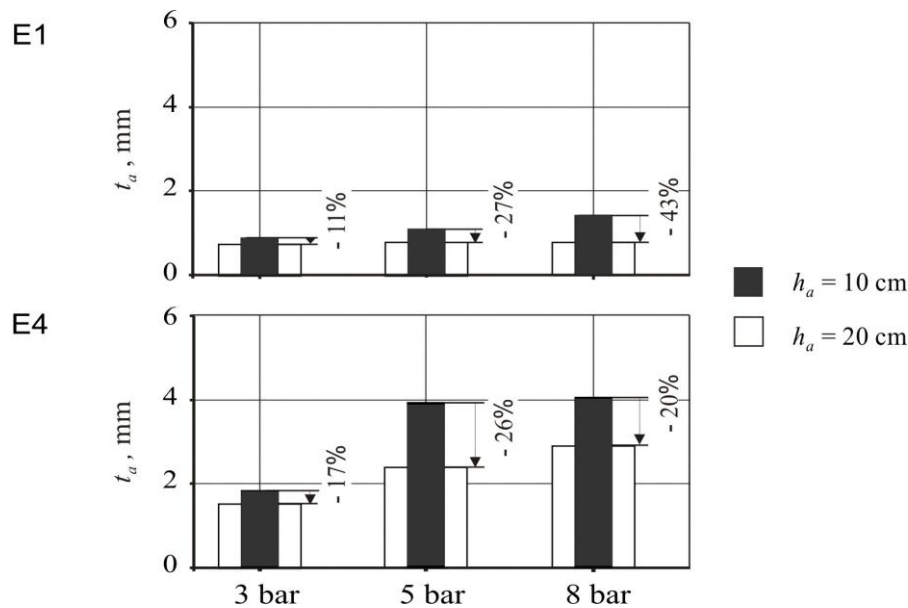


Bild 5.9 Veränderung der mittleren Abtragtiefe t_a der Strahlen mit E1 und E4 in Abhängigkeit der variierenden Betriebsparameter p und h_a

Auffallend ist bei näherer Betrachtung von **Bild 5.9** der nicht progressive Verlauf der t_a über den p . Mit E4 kommt beispielsweise bei einer Spritzdrucksteigerung von 5 auf 8 bar die $t_{a,h=10}$ nicht so ausgeprägt zur Geltung (ca. 1,1fach) wie bei der Steigerung von 3 auf 5 bar (2,3fach). Die mit dem p überproportional ansteigende Strahlleistung $e_{s,h=0}$ wird offenbar durch die ebenfalls prinzipiell mit steigender Abtragstiefe t_a progressiv anwachsenden Reibungs- und Dämpfungsverluste auf die Aufprallfläche kompensiert. Zudem steigt mit der Strahldichte, wie in **Abschnitt 4.1.3** erläutert, prinzipiell die durch die Interaktion der Strahlfragmente und Tropfen bewirkte Geschwindigkeitsabnahme des Strahls progressiv an. So kann die mit dem d_d und dem p theoretisch quadratisch bzw. progressiv ansteigende Strahlleistung offenbar nicht in gleicher Form in Abtragstiefe t_a umgesetzt werden.

Wird zwischen den Düsen der Einfluss der Abstandsanhebung von 10 auf 20 cm mit einhergehender Vergrößerung der A_s betrachtet, so wird der Einfluss des d_d auf die abtragswirksamen Strahlzone mit der höheren Abtragsfläche A_a deutlich (vgl. **Bild 5.7**).

Während bei Strahlen mit E1, abgesehen von $p = 8$ bar, eine deutliche Abnahme der A_a mit steigendem h_a auf 20 cm zu beobachten ist, macht sich die Abstandsanhebung bei Strahlen mit E4 in erhöhten A_a bemerkbar. Dennoch sinkt entsprechend **Bild 5.8** die $A_{a,h=20}$ gegenüber der $A_{s,h=20}$ bei gleichen Spritzbedingungen. Diese Flächenreduktion fällt jedoch bei E1 mit einem Flächenratio $\xi_{a,h=20}$ zwischen 0,1 bis 0,3 höher aus als bei E4 ($0,6 \leq \xi_{a,h=20} \leq 0,7$).

Durch diese Abstandsanhebung sind auch fallende t_a bei beiden Düsen zu verzeichnen (vgl. **Bild 5.9**). Es kommt bei E4 zwar zu einer Reduktion der t_a , diese fällt jedoch bei den untersuchten p mit 17 bis 29% nicht so deutlich aus wie bei E1 mit 15 bis 45%.

Erklärbar wird dieser Effekt der Abstandsvergrößerung, ähnlich wie beim Parameter p , mit

einer Verschiebung der Belastungsarten bzw. Wirkungsmechanismen des Strahls.

Die Abtragseffektivität jeder Düse tritt mit vorgegebenem d_d unter konstanten Betriebsparametern bei bestimmtem Arbeitsabstand h_a auf. In Abhängigkeit des h_a einhergehend mit der Art (statisch/dynamisch oder gemischt) und der spezifischen Höhe der Strahlbelastung besteht bei Standardtestkörpern ein deutlicher energetischer Vorteil bei durch Erhöhung der Volumenstromrate Q hervorgerufenen Abtragsleistungssteigerung unter Konstanzhaltung des p .

Bei der E4 und dem 20 cm h_a wird das abzutragende Material vorwiegend mit der kompakten Strahlzone beansprucht. Die Strahlen der E1 weiten sich hingegen wesentlich breiter aus mit einhergehender stärkerer Reduktion des erosiven kompakten Strahlanteils bzw. Verringerung der spezifischen Strahlbelastung infolge der vergrößerten Nebelzone mit kleinen Tropfen.

Aus den erzielten Abtragsergebnissen lässt sich auch schließen, dass die sich aus der Abstandsanhebung von 10 auf 20 cm ergebende Wirkungseinbuße durch den infolge der Spritzdruckerhöhung gesteigerten Stoßbelastungsanteil des Strahls kompensiert werden kann.

Bei einer Strahlleistung $e_{s,h=0}$, die mit E1 bei 8 bar und mit E4 bei $p = 5$ bar in h_a von 20 cm zum Materialabtragen aufgebracht wird, lassen sich Abtragsflächen in ähnlicher Größenordnung erzeugen, wie die in $h_a = 10$ cm mit der jeweiligen Düse bei p von 3 bar (vgl. **Bild 5.7**). Demzufolge muss ein Strahl in 20 cm h_a eine höhere $e_{s,h=0}$ besitzen, um bei gleichen Spritzbedingungen ein vergleichbares Abtragsvolumen wie in 10 cm h_a zu erzielen. Das bedeutet auch, mit abnehmendem p verschiebt sich der optimale d_d bei einer vorgegebenen Abtragsleistung zum größeren Wert hin.

5.1.2.3. Regressionsanalyse der ermittelten Strahldaten

Um quantitative Aussagen hinsichtlich der funktionellen Zusammenhänge der relevanten Parameter im Abtragsprozess treffen zu können, wurden Regressionsanalysen anhand der mittleren P_{max} und Abtragstiefe t_a durch Strahlen unterschiedlicher Eigenschaften, deren Inputparameter innerhalb der in **Tabelle 4.2** angegebenen Intervalle liegen, durchgeführt.

Die statistische Auswertung der extrahierten Strahlparameter aller Versuchsreihen zeigt, dass mit linearen Anpassungsfunktionen eine Bündelung der Messdaten in guter Näherung gelingt. Die linearen Korrelationsfunktionen, siehe **Anhang B, Bild B1**, zeigen, dass eine hohe Korrelation zwischen $I_{s,sp}$ und $C_{s,sp}$ mit einem Regressionskoeffizient $R^2 = 0,98$ vorliegt.

Im **Anhang B, Bild B2** ist die Maximaldruckfunktion über $I_{s,sp}$ der definierten Strahlvarianten in beiden h_a von 10 und 20 cm dargestellt.

Die Regressionskoeffizient R für den Grad des linearen Zusammenhangs beträgt 0,87 ($R = 0,89$ für $h_a = 10$ cm und $R = 0,85$ für $h_a = 20$ cm), das heißt, die Verteilungen der $I_{s,sp,h=f(z)}$ und der P_{max} sind hochkorreliert.

Der t_a -Verlauf aller Versuchsreihen als Funktion der $I_{s,sp}$ lässt sich, wie aus **Anhang B, Bild B3** zu ersehen ist, durch die lineare Anpassungsfunktion ($R^2 = 0,89$) gut beschreiben.

Der Vergleich der Steigungen a der Ausgleichsgeraden deutet darauf hin, dass sich der Einfluss des p auf die erzielten t_a bei einzelnen h_a der Strahlen mit dem eingesetzten d_d ändert.

Die Abtragtiefeendaten der Versuchsreihen bei $h_a = 10$ cm lassen sich durch eine Ausgleichs-

gerade approximieren ($R = 0,94$), wobei die Steigung a der Gerade bei $a = 3,2$ liegt. Die t_a steigt dabei nahezu proportional zur $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen an, deren nahezu lineare Steigung mit der Steigung der $I_{s,sp}$ zu beobachten ist. Die Steigerung der $I_{s,sp,h=f(z)}$ geht dabei, wie in vorangegangenen Abschnitten beschrieben, mit der Erhöhung des d_d oder p einher. Mit höherem d_d (E4) bei p von 3 bar kann man zwar eine 6,7mal höhere $I_{s,sp,h=10}$ des abtragswirksamen Strahls gegenüber der Strahlvariante E1_18 ($I_{s,sp,h=10} = 0,7 \text{ g m s}^{-1}$) realisieren, jedoch fällt der Anstieg der $t_{a,h=10}$ gegenüber mit 1,4 mm (1,3fach) relativ gering aus. Dieser Effekt kann durch eine Steigerung des p kompensiert werden.

Mit steigendem h_a der Strahlen auf 20 cm wird die lineare Anpassungsfunktion ($R = 0,51$) zu geringeren Werten hin verschoben. Deren Steigung liegt etwa um den Faktor 0,5 niedriger ($a = 1,6$) als für den h_a von 10 cm.

Zur detaillierten Interpretation der im **Anhang B, Bild B3** dargestellten Zusammenhänge zeigt **Tabelle 5.4** das Ergebnis der Regressionsanalyse für die Abtragstiefen t_a durch verschiedene Strahlvarianten differenziert nach den Inputparametern d_d (E1 und E4), h_a und p .

Tabelle 5.4 Lineare Anpassungsfunktionen zwischen der t_a und $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen verschiedener Strahlvarianten

Strahlvarianten	E1_13, E1_15, E1_18	E4_13, E4_15, E4_18	E1_23, E1_25, E1_28	E4_23, E4_25, E4_28
R^2	0,82	0,96	0,44	0,97
a	9,3	6,2	5,6	9,0

Mit d_d nehmen die erfassten Strahlwirkungsparameter t_a und P_{max} , ähnlich wie bei $I_{s,sp}$, nahezu linear zu. Mit der größeren Düse (E4) wird bei $h_a = 20 \text{ cm}$ die mit dem p ansteigende Strahlenergie $e_{s,h=0}$ effektiver in Abtragsvolumen (vgl. **Gleichung 4.3**) umgesetzt als bei $h_a = 10 \text{ cm}$. Mit der kleineren Düse (E1) verschiebt sich der energetisch günstigere h_a für eine effektivere Strahlenergieumsetzung zum geringeren Wert ($h_a = 10 \text{ cm}$).

Die in Abhängigkeit von diesen Prozessparametern d_d und p einzustellende $C_{s,sp}$ (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.2**) und die daraus resultierende $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen wird nach den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Abtragsergebnissen als abtragsrelevanter Strahlstrukturparameter angesehen.

Während die Beziehungen $I_{s,sp} \sim P_{max}$ bzw. $I_{s,sp} \sim t_a$ recht deutlich zu erkennen sind, schwankt t_a mit P_{max} sehr stark. Daher erscheint die flächige Verteilung der erfassten P_{max} nicht als geeigneter Parameter zur Beschreibung der erzielten Abtragungseffektivität. Anzumerken ist dabei, dass der Wert von P_{max} oft nur von einem einzelnen, kurzen Peak bestimmt wird, wobei unklar ist, wie lang dieser Druck anliegen muss, um überhaupt abtragswirksam zu werden.

Die Hypothese, dass erst Tropfen mit Tropfendurchmesser $d_t \geq 300 \text{ }\mu\text{m}$ abtragswirksam sind, konnte hier experimentell bestätigt werden. Demzufolge liefert die Volumenstromrate $V_{s,sp}$ aller Tropfengrößenklassen mit der erzielten t_a eine geringe Korrelation ($R^2 = 0,6$), jedoch liegt der R^2 für die $t_a(C_{s,sp})$ der wirksamen Tropfengrößenklassen stets bei 0,8. Somit liegen

bei Differenzierung der Abtragsdaten nach den Inputparametern d_d und h_a mittel bis hohe Korrelationen vor.

Der Abtragsprozess ist also im Hinblick auf eine geeignete Tropfengrößenverteilung (d_{32}) und eine hohe $C_{s,sp}$ der abtragswirksamen Strahlsegmente und Tropfen zu optimieren. Damit sind $C_{s,sp}$ und $I_{s,sp}$ diese geeigneten Strahlparameter zum Vergleich verschiedener Düsen und deren Betriebsbedingungen.

5.1.3 Strahleffizienzanalyse bei der Materialabtragung

Nach **Abschnitt 3.2** setzt sich der Abtragsprozess aus der Überwindung der Adhäsion und dem Abtransport der herausgelösten Materialpartikel zusammen. Der Niederdruckwasserstrahl stellt ein anpassungsfähiges Werkzeug dar, das je nach Inputparameter der Strahlbildungsprozesse in seiner Wirkungsweise und Abtragseffektivität veränderlich ist. Ob durch einen Niederdruckstrahl nur ein oberflächliches Abtragen des losen Materials oder ein Herauslösen einzelner Materialpartikel ausgeübt wird, ist daher im Wesentlichen von der Belastungsart (statisch/dynamisch/überlagert) und -höhe der aufschlagenden Strahlsegmente und Tropfen, der spezifischen Belastungssumme und dem Zusammenwirken dieser Faktoren abhängig.

Die primäre Frage ist hier, welche Strahlausbildung der untersuchten Spritzbedingungen einen optimalen Belastungszustand für einen effektiven Materialabtrag auf den Sand-Bindemittelgemisch-Platten darstellt. Nach **Abschnitt 3.2.4** tritt das Herauslösen eines Materialpartikels dann auf, wenn die dynamisch äquivalente spezifische Strahlbelastung durch die Mehrfachtropfenaufschläge die Riss- und Bruchfestigkeit des abzutragenden Materialverbundes übersteigt. Dabei reagieren spröde Materialien, wie die Sand-Bindemittelgemisch-Platten, auf geringe Stoßdruckbelastungen empfindlich.

Für die Abschätzung des Strahlpotentials zum effektiven Materialabtrag wurde eine Mindestabtragstiefe t_a von 2 mm für die Belastungszeit t_b von 15 s festgelegt. Messdaten mit geringem oberflächlichem Materialabtrag wurden nicht berücksichtigt.

Bei einem effizienteren Strahleinsatz zum Materialabtragen ist das Abtragsergebnis mit einem Minimum an eingesetzter Zeit und Strahlenergie $e_{s,h=0}$ zu verwirklichen. Das heißt, bei vergleichbar maximaler Abtragsflächenleistung wird eine geringere $e_{s,h=0}$ bevorzugt, während ein höheres ξ_{ae} und eine größere $E_{s,ve}$ einen geeigneten Strahl beschreiben. Um auf den Testkörpern maximale A_{ae} mit den gewünschten effektive Abtragstiefe t_{ae} (höhere Flächenratio ξ_{ae}) erzielen zu können, muss dem Material eine definierte spezifische Energiemenge zugeführt werden, die sich aus einem Trennenergieanteil zum Überwinden der Kohäsion- und Adhäsionskräfte und einem inneren Reibungs- und Dämpfungsanteil (vgl. **Abschnitt 3.2.3**) zusammensetzt. Während die Trennenergie einen konstanten, materialspezifischen Wert darstellt, wächst der Reibungs- und Dämpfungsanteil mit steigender Strahldichte und t_a an.

Der Einfluss des maßgeblichen Inputparameters d_d wird in der Änderung der effektiven Abtragsfläche A_{ae} und -tiefe t_{ae} in **Bild 5.10** anschaulich.

Die bei Variation der verschiedenen Einflussparameter d_d , p und h_a gemessenen Abtragsdaten

und berechneten Größen zur Abtragseffektivität und -effizienz verschiedener Strahlvarianten mit den beiden Düsen E1 und E4 zeigt **Tabelle 5.5**.

Eine wichtige Frage ist, ob die Parameter im Strahlbildungsprozess d_d oder p einen starken Einfluss auf die Abtragseffektivität bzw. Strahleffizienz haben. Betrachtet man hierzu das erzielte Abtragsvolumen, wird die erzielbare effektive Abtragsfläche A_{ae} bzw. Abtragstiefe t_{ae} durch die dem Strahl zur Verfügung gestellten Strahlleistung $e_{s,h=0}$ (vgl. **Gleichung 3.5**) beeinflusst. Dabei ist es relevant, wie die $e_{s,h=0}$ auf das abzutragende Material aufgebracht wird.

Ein Vergleich zwischen den Parametern d_d und p , in Form einer vorrangig durch Volumenstromerhöhung verursachten Strahlenergievergrößerung bzw. einer durch Spritzdruck-erhöhung hervorgerufenen Energiesteigerung, zeigt Unterschiede bei dem auf die Strahlenergiesteigerung bezogenen Anstieg der t_{ae} . Die Erhöhung des d_d ist gemäß der hier erzielten Abtragsdaten eine weitaus effektivere Möglichkeit, einen hohen Abtragsgrad zu erzielen.

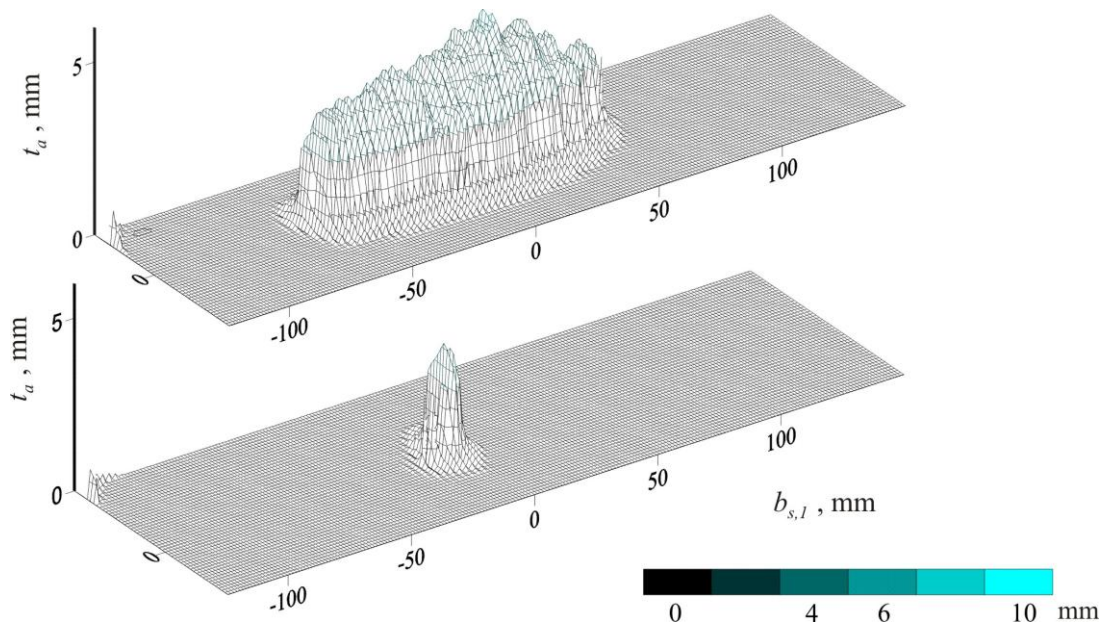


Bild 5.10 Effektive Abtragstiefe t_{ae} durch Wasserstrahlen bei Düsen E1 (E1_13) und E4 (E4_13) bei denselben Spritzbedingungen wie in **Bild 5.6**

Im Vergleich zu E4 treffen bei E1 weniger wirksame Strahlsegmente und Tropfen pro Zeiteinheit auf eine kleine Aufprallfläche des abzutragenden Materials, was zu einem Absinken der auf das Material einwirkenden Belastung führt.

Ein effektiver Materialabtrag, d. h. $t_a \geq 2$ mm auf die Testkörper bei $t_b = 15$ s, ist vorwiegend in der unmittelbaren Umgebung der Strahlachse im Strahlkern [K] und in der Strahlmitte [M] zu beobachten.

Der $\theta_{s,ae,h=10}$ der effektiven Strahlzone zur Strahlachse liegt bei den untersuchten Spritzbedingungen mit E1 im Bereich von 80° bis 60° (**Tabelle 5.5**). Die entsprechende Flächenratio $\xi_{ae,h=10}$ beträgt maximal 40%, bezogen auf die unter denselben Spritzbedingungen erzielten $A_{s,h=10}$. Erwartungsgemäß macht sich jedoch die Spritzdruckerhöhung von 3 auf 8 bar mit E1 durch 2fache Steigerung der zum Strahlrand [R] hin anwachsenden A_{ae} bemerkbar.

Tabelle 5.5 Vergleich der Abtragseffektivität und Effizienz der Strahlen unter veränderten Spritzbedingungen; effektiver Strahlwinkel $\theta_{s,ae,h=f(z)}$, effektive Abtragsfläche A_{ae} , Flächenratio ξ_{ae} und Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ (vgl. Bild 5.7 bis 5.9)

Strahlvariante	$\theta_{s,ae}$ Grad	A_{ae} cm ²	ξ_{ae} —	$E_{s,ae}$ mm ³ Nm ⁻¹
E1_13	81,4	8,8	0,1	0,94
E1_15	73,4	12,1	0,3	0,55
E1_18	62,1	16,9	0,4	0,49
E4_13	59,2	27,7	0,9	0,79
E4_15	48,8	38,4	1,2	0,86
E4_18	51,8	36,5	1,0	0,48
E1_23	—	—	—	—
E1_25	—	—	—	—
E1_28	—	2,7	—	0,06
E4_23	74,1	25,6	0,3	0,62
E4_25	67,2	25,1	0,3	0,28
E4_28	63,9	42,3	0,4	0,35

Betrachtet man die ermittelten Werte der Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ der Wasserstrahlen, weisen die Strahlen in 10 cm h_a eine geringe $E_{s,ve}$ auf, da sich die wirksame Materialbeanspruchung über die vorgegebene Strahlwirkdauer t_b durch die Strahlen jeweils auf relativ kleine Bereiche beschränkt. Eine lineare Abnahme der Abtragseffizienz von 0,94 mm³ Nm⁻¹ bei $p = 3$ bar auf 0,49 mm³ Nm⁻¹ bei $p = 8$ bar wird dabei erzielt. Bei einem h_a von 20 cm verlieren die Strahlen aller Versuchsreihen mit E1 ihre Kohärenz und folglich ihre spezifische Abtragswirkung aufgrund der mit zunehmendem h_a deutlich fallenden Impulsintensität $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfen. Die erreichbare A_{ae} nähert sich asymptotisch dem Null-Wert. Es findet nur noch ein oberflächennahes Abtragen statt.

Als Aussage lässt sich formulieren, dass die Volumenstromraten Q der E1 unter den hier angewandten Spritzbedingungen als kritische Grenzwerte der über die definierte Zeit zugeführten Strahlmassenstromdichte $C_{s,sp}$ für eine effektive und effiziente Materialabtragung gedeutet werden können. Die Begründung liegt in der energetisch ungünstigen Divergenz und der Mikrostruktur der Strahlen von E1.

Durch die Anwendung von E4 mit 5facher Vergrößerung des Q steigt der $\theta_{s,ae,h=10}$ mit effektivem Materialabtrag (60° bis 50°) deutlich an. Mit der sich aus der Erhöhung der Q ergebenden zusammenhängenden bzw. kompakten Strahlen und deren radialem Abströmen steigt die $A_{ae,h=10}$ um den Faktor 2 bis 3,2 höher an als die mit E1 unter gleichen Spritzbedingungen. Dieses spiegelt sich auch in der Steigerung der $\xi_{ae,h=10}$ wider, die mit E4 und der Spritzdrucksteigerung von 3 auf 8 bar (90 bis 120%) wesentlich ausgeprägter zur Geltung kommt.

Zur Erklärung des Effizienzverlaufs für die Strahlen mit E4 soll hier anhand der erhaltenen Daten zu den Strahleigenschaften und dem Materialabtrag folgende Hypothese aufgestellt werden:

Die Anwendung der mit E4 erzeugten Strahlen in einem h_a von 10 cm stellt den uneffizienten Strahleinsatz zur Materialabtragung dar. Der Anstieg der $A_{ae,h=10}$ durch Strahlen der E4 fällt bei der entsprechenden Spritzdruckerhöhung (1,3fach) trotz eingehender Vergrößerung des Q nicht so stark aus wie bei den Strahlen der E1. Zwar lässt sich durch den Einsatz von E4 eine Steigerung der $\xi_{ae,h=10}$ verzeichnen, dennoch kann die mit E4 und entsprechender Spritzdrucksteigerung progressiv ansteigende $e_{s,h=0}$ offensichtlich nicht in gleicher Form in t_a umgesetzt werden. Aufgrund der infolge von strahlinternen Reibungs- und Dämpfungseffekten erhöhten Energieverlustanteile müssen die Abtragsstrahlen eine höhere mittlere Strahlenergie zur Verfügung stellen, um einen Partikel aus dem Materialverbund herauszulösen. Dies hat eine Minderung der Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ zur Folge.

Bei einem größeren h_a von 20 cm erfolgt mit E4 eine effektive Materialbeanspruchung durch den kompakten Strahl im Bereich von 60° bis 75° $\theta_{s,ae,h=20}$. Die Flächenratio $\xi_{ae,h=20}$ sind um ein 3- bis 4faches kleiner als bei einem $h_a = 10$ cm, was auf eine Abnahme der mittleren $C_{s,sp}$ einhergehend mit zur Strahlachse hin ansteigender Reduktion der Abtragseffektivität zurückzuführen ist. Es kommt dabei, außer beim Strahl von $p = 8$ bar, zum Rückgang der $A_{ae,h=20}$, welches sich auch in der Senkung der $E_{s,ve}$ (30 bis 60%) widerspiegelt.

Es kann somit festgestellt werden, dass unter den untersuchten Spritzbedingungen, insbesondere unter $p = 3$ bar, ein effizienterer Strahleinsatz zum Materialabtrag mit E4 bei einem Arbeitsabstand h_a von $10 \text{ cm} < h_a < 20 \text{ cm}$ vorliegt.

5.2. Strahlanwendung für die Gemüeswäsche

Ein besonderes Problem bei der Strahlanwendung zur Gemüesreinigung liegt im fehlenden Widerstand des pflanzlichen Gewebes gegenüber der zur Abtrennung des abzutragenden Erdmaterials und zur Überwindung der Adhäsion notwendigen Beanspruchung.

Die technische Zielstellung besteht daher in der Realisierung günstiger Strahlcharakteristiken zur Gewährleistung einer effektiven und effizienten Gemüesreinigung, ohne dabei die Gemüseoberfläche durch den aufprallenden Reinigungsstrahl zu beschädigen. Die jeweilige Düsenauswahl und die Festlegung der Betriebsbedingungen setzen damit präzise Kenntnisse über das Reinigungs- und Schädigungspotential der Wasserstrahlen voraus.

Um detaillierte Erkenntnisse über die Abtragsfähigkeit und Effizienz der verschiedenen Wasserstrahlen zu erhalten, wurden zunächst auf Grundlage der in **Abschnitt 4.2** vorgestellten Bewertungsansätze weitergehende Abtragsversuche an den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten durchgeführt. Für die Übertragung der auf den standardisierten Testkörpern erzielten Abtragsergebnisse auf die Randbedingungen der Gemüesreinigung wurden anschließend die Reinigungs- und Schädigungspotentiale der Strahlen an verschiedenen Gemüsearten (vgl. **Tabelle 4.3**) untersucht.

5.2.1. Teilflächendifferenzierte Betrachtung der Abtragseffektivität und Strahleffizienz

Hydrodynamische Parameter wie Größen- und Geschwindigkeitsverteilung des zerfallenen Tropfenstrahls sowie stoffliche Größen wie Dichteprofile im dispersen bzw. zusammenhängenden Strahl sind grundlegende Daten für die Auslegung der Abtragsprozesse.

In den Abtragsversuchen sind nun Betriebspunkte zu realisieren, die bei vergleichbar effektiver effizienter Abtragsstrahlenergie $e_{s,ae}$ eine ausreichend hohe Abtragsleistung aufweisen. Hierzu wurden die in **Tabelle 4.1** aufgeführten Flachstrahl- und Vollkegeldüsen in Variation der Betriebsbedingungen untersucht.

Die über den Querschnitt stark inhomogene Verteilung der o.g. Strahlparameter beeinflusst die charakteristischen Abtragsergebnisse unterschiedlich. Zur Berücksichtigung der variablen Charakteristiken innerhalb der Strahlfläche werden repräsentative Teilflächen bestimmt, in denen annähernd gleiche Eigenschaften wie Komponenten der Tropfengeschwindigkeit v_t , die Tropfengrößenverteilung und die Massenstromdichte $C_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfen zusammengefasst sind. Dies geschieht dadurch, dass entsprechend **Bild 4.10** die A_s in verschiedene Zonen mit charakteristischen Bereichen des Strahlwinkels $\theta_{s,h=f(z)}$ unterteilt werden. Ausgehend von der Teilfläche **Strahlkern** [K] mit dem nahezu senkrechten Strahlauftreffwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ ($90^\circ - 68^\circ$) bilden sich so nach außen zwei weitere Teilflächen: **Strahlmitte** [M] ($68^\circ - 51^\circ$) und **Strahlrand** [R] ($\theta_{s,h=10} < 51^\circ$ bzw. $\theta_{s,h=20} < 68^\circ$).

Für die jeweilige Teilfläche TF wurde u. a. die Tropfengrößenverteilung, die Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen in Variation des Spritzdrucks p und des Arbeitsabstands h_a und ebenso die erzielte Abtragstiefe t_a auf den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten bestimmt.

In **Anhang C** sind die teilflächendifferenzierten Strahlcharakteristiken in Abhängigkeit der variierbaren Betriebsbedingungen angegeben. Anhand einiger Beispiele der teilflächenbezogenen Messdaten wird im Folgenden die Beziehung der Ausbildung und des Abtragsverhaltens der Strahlen differenziert nach Flachstrahl- und Vollkegeldüsen verdeutlicht.

5.2.1.1. Flachstrahldüsen, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$

h_a von 10 cm

Nach **Anhang C**, **Tabelle C1** ist eine Übereinstimmung der ermittelten Maximaldruckwerte P_{max} mit den mittleren t_a auf den Testkörpern erkennbar. Das Druckmaximum, wie auch die maximale t_a , liegen im Bereich des [K]. Die Werte dieser Strahlparameter fallen vom Strahlkern [K] radial zum Strahlrand [R] ab.

Um diese Tatsache näher analysieren zu können, werden die teilflächenbezogenen Veränderungen der Strahlparameter $V_{s,sp}$, $I_{s,sp}$, in **Bild 5.11** und $E_{s,ve}$, ξ_{ae} in **Bild 5.12** bei Variation der Inputparameter d_d und p aufbereitet dargestellt.

In **Bild 5.11 a** und **Bild 5.11 b** werden exemplarisch die unterschiedlichen teilflächenbezogenen $V_{s,sp,h=10}$ und $I_{s,sp,h=10}$ der Strahlen unter $p = 5$ bar für die verschiedenen Düsen E1 bis E4 mit steigendem d_d bzw. bei Erhöhung des p von 3 auf 8 bar für E1 und E4 gegenübergestellt.

Deutlich zu erkennen ist, dass bei den hier angewandten Spritzbedingungen die höhere $V_{s,sp}$ und die daraus resultierende höhere $C_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen im Strahlkern [K] ist. Der direkte Vergleich nach **Bild 5.11 a** zeigt, dass die Erhöhung des d_d bei gleichzeitiger Steigerung der Q zum erhöhten Variationsgrad der $V_{s,sp}$ und $I_{s,sp}$ der wirksamen

Strahlsegmente und Tropfen zwischen den Strahlteilflächen führt.

Die Strahlen aus E1 weisen hingegen wegen der relativ kleinen Austrittsdurchmesser eine höhere Turbulenz am Düsenaustritt auf, welche eine für den Strahlzerfall vorteilhafte Divergenz bewirkt. Die Teilflächen weisen Volumenstromdichten $V_{s,sp}$ bzw. Impulsintensitäten $I_{s,sp}$ in nahezu ähnlicher Größenordnung auf. Beispielsweise bei $p = 5$ bar ergibt sich für E1 ein Verhältnis der mittleren $I_{s,sp,h=10}$ zwischen den Teilflächen [K] : [M] : [R] von 1,6 : 0,9 : 1.

Mit der Vergrößerung des d_d steigt in allen Strahlteilflächen die $V_{s,sp}$ und folglich die $I_{s,sp}$ an. Dennoch fällt damit der Anstieg der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen im [K] stärker aus, so dass die Differenz der $I_{s,sp}$ zwischen den Teilflächen einhergehend mit ansteigender Stabilität und Kohärenz des austretenden Strahls zunimmt.

Bei E3 liegt das Verhältnis der $I_{s,sp,h=10}$ zwischen den Teilflächen beispielsweise unter einem p von 5 bar bei 2,2 : 1,5 : 1 und erhöht sich zu 4,4 : 2,2 : 1 mit E4.

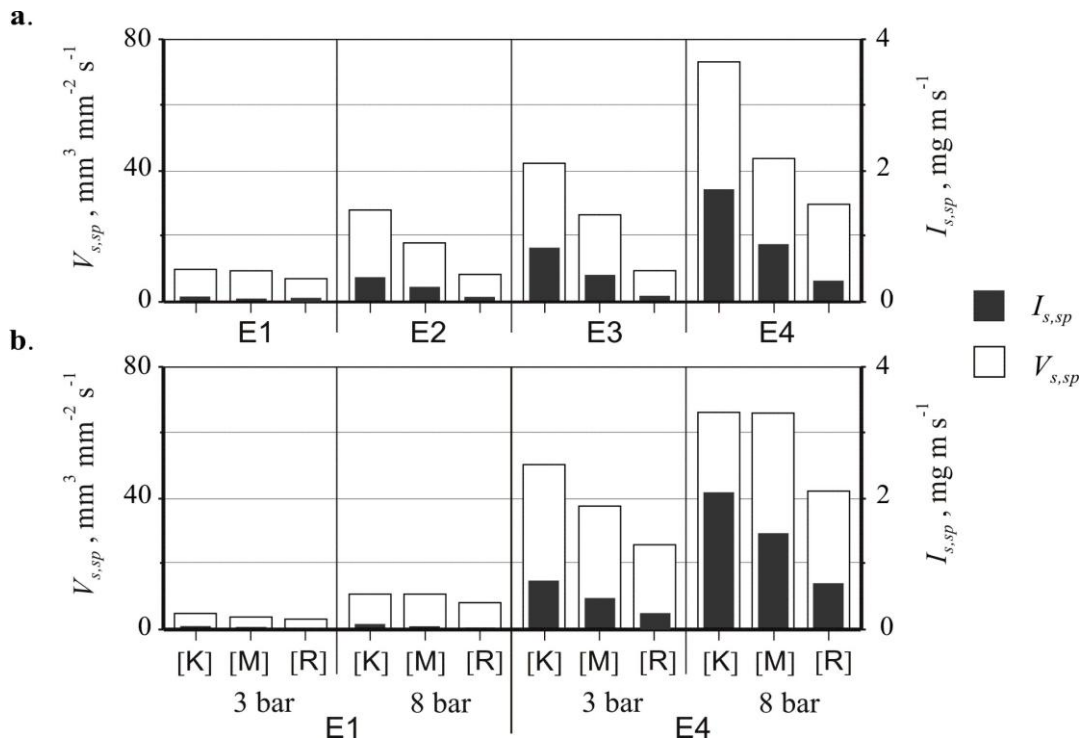


Bild 5.11 Veränderungen der teilflächenbezogenen ([K], [M], [R]) Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ bei $h_a = 10$ cm und Vergrößerung des $d_d = 0,75$ (E1) bis 1,7 mm (E4) bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruckanstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b)

Vergleicht man anhand von **Bild 5.12 b** den Anstieg der teilflächenbezogenen $I_{s,sp,h=10}$ der wirksamen Strahlen bei E1 und E4 bei Erhöhung des p miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

Bei E4 fällt das Verhältnis der $I_{s,sp,h=10}$ unter p von 3, 5 und 8 bar mit 1 : 2,3 : 2,9 für den [K] und 1 : 2 : 2,7 für die [M] relativ höher aus, als der mit E1 (1 : 2 : 2,3 für [K] bzw. 1 : 2,1 : 2,1 für [M]) bezogen auf den jeweiligen, bei $p = 3$ bar erzielten Wert. Für den [R] werden hingegen mit E1 bei entsprechender Spritzdruckerhöhung größere Anstiege der $I_{s,sp,h=10}$ (1 : 25,8 : 10,5) erzielt als mit E4 (1 : 1,2 : 2).

Aufgrund der düsenspezifischen Strahldivergenz und daraus resultierenden Massenstromdichte- und Tropfengrößenverteilung erfolgt die Umsetzung der Druckerhöhung in effektive Abtragstiefe t_{ae} bei Düsen verschiedener d_d teilflächenbezogen unterschiedlich. Werden die teilflächenbezogenen Materialabtragungen durch die verschiedenen Strahlvarianten betrachtet, so ist eine zum [R] hin anwachsende effektive Abtragsfläche A_{ae} mit Erhöhung der am Düsenausgang zur Verfügung gestellten Strahlenergie (vgl. **Gleichung 3.5**) zu beobachten.

Deutlich zu erkennen ist, dass die effektive Materialabtragung durch die Strahlen mit E1 vorwiegend im Bereich des [K] erfolgt, welche sich mit der Erhöhung des p bis zur [M] ausweitet. Die erzielbare Flächenratio $\xi_{ae,h=10}$ für den effektiven Materialabtrag mit E1 liegt zwischen 0,56 bis 0,96 für den [K] und 0,13 bis 0,39 für die [M] bei Variation des p zwischen 3 und 8 bar (**Bild 5.12**). Dies entspricht einem abtragswirksamen Strahlvolumenanteil unterhalb von 65%. Dieses Verhalten ist mit der energetisch ungünstigen Strahldivergenz zu erklären.

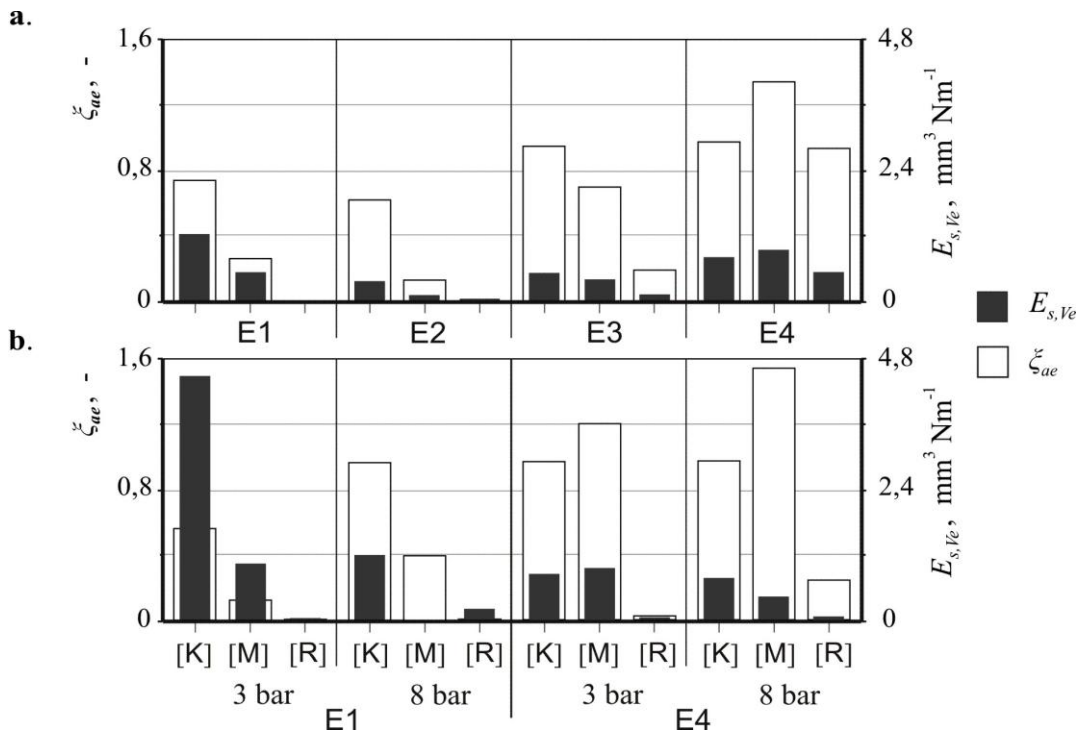


Bild 5.12 Gegenüberstellung der teilflächenbezogenen ([K], [M], [R]) Mittelwerte der ξ_{ae} und der $E_{s,ve}$ bei $h_a = 10$ cm und Vergrößerung des $d_d = 0,75$ (E1) bis 1,7 mm (E4) bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruckanstieg von 3 auf 8 bar für E1 und E4 (b)

Der beispielsweise mit E2 bei $p = 5$ bar gebildete Strahl mit $Q = 4,2$ l min⁻¹ ist bei den hier untersuchten Spritzbedingungen auch in der [M] und im [R] untersättigt. Das Abtragsmaterial wird nicht effektiv beansprucht. Entsprechend der erfassten Flächenverhältnisse zwischen Abtrags- A_a und Strahlflächen A_s liegt die abtragseffektive Spritzbreite $b_{s,l,ae}$ in der Größenordnung im Bereich $20 \leq b_{s,l,ae,h=10} \leq 84$ mm bei einer Spritzbreite $b_{s,l}$ $224 \leq b_{s,l,h=10} \leq 272$ mm. Daraus ergibt sich, dass nur ein geringer Anteil des zugeführten Strahlvolumens für einen effektiven Materialabtrag zur Verfügung steht. Der sich einstellende Maximalwert der $b_{s,l,ae}$ von 84 mm (-45,7 mm bzw. +38,1 mm von der Strahlachse) umfasst nur den [K], ent-

sprechend einem maximalen effektiven Strahlwinkel $\theta_{s,ae,h=10}$ von $65,4^\circ$.

Zu erkennen ist, dass durch die weitere Erhöhung der Q bei gleichem p eine zum [R] hin stärker ausgeprägte Steigerung der Abtragseffektivität erzielt werden kann. Diese zeigt sich auch in der Steigerung der teilflächenbezogenen $\xi_{ae,h=10}$, die beispielsweise bei $p = 5$ bar mit E3 im Bereich von $0,2 \leq \xi_{ae} \leq 0,9$ und mit E4 im Bereich $0,9 \leq \xi_{ae} \leq 1,3$ über die Strahlteilflächen variieren. Das $\xi_{ae,h=10}$ für die Strahlteilfläche [K], [M] und [R] ist somit mit E3 etwa um den Faktor 1,2, 3,2 bzw. 18,7 und mit E4 um den Faktor 1,2, 6,1 bzw. 154,5 höher als das mit E2 (**Bild 5.12 a**).

Auffallend ist bei der Betrachtung von **Bild 5.12** dennoch die relativ höhere $E_{s,K,ve,h=10}$ aller Versuchsreihen mit E1, welche auf eine effektivere Umsetzung der in [K] zur Verfügung stehenden $e_{s,h=0}$ in Abtragtiefe t_a hindeutet. Die $E_{s,K,ve,h=10}$ des Strahls mit E1 verkleinert sich bei einer Erhöhung des p von 3 auf 8 bar von $4,5 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$ ($V_{s,sp} = 4,6 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) um 73% auf $1,2 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$ ($V_{s,sp} = 11 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Bei den dünnen Strahlen mit E1 ist dieser Rückgang der $E_{s,K,ve}$ vornehmlich auf den tropfenzerkleinernden Effekt der Spritzdrucksteigerung aufgrund der für den Zerfall vorteilhaften Strahldivergenz zurückzuführen.

Zwar ist mit E1 eine höhere $E_{s,ve,h=10}$ für den [K] und die [M] zu verzeichnen, dennoch erscheinen die mit E1 erzeugten Strahlen aufgrund ihrer sehr geringen Strahlflächenleistung $e_{s,h=0}$ und Impulsintensität $I_{s,sp}$ vor allem für den effektiven und effizienten Strahleinsatz ungeeignet.

Mit dem Einsatz von E3 lässt sich eine effektive $b_{s,l,ae}$ von 155 mm (-71 mm bzw. $+84$ mm von Strahlachse; maximaler $\theta_{s,ae,h=10} = 50^\circ$) bei einer $b_{s,l}$ bis 208 mm bestimmen.

Der entsprechende Wert liegt mit E4 bei 175,3 mm (-79 mm bzw. $+97$ mm von Strahlachse; maximaler $\theta_{s,ae,h=10} = 45,9^\circ$) bei einer $b_{s,l}$ bis 224 mm.

Die Anwendung von E3 und E4 äußert sich in einer zum [R] hin verstärkten Strahlleistung bei gleichzeitiger Steigerung der $E_{s,ve,h=10}$. So ergibt sich im [R] eine um den Faktor 19 bzw. 93 höhere $E_{s,ve,h=10}$ als mit E1. Im Vergleich zu E2 ruft der Einsatz von E3, die bei konstantem p einen Strahl mit 1,5fach vergrößerter Q erzeugt, eine um das 1,1-, 2,3- und 6,2fach höhere $E_{s,ve,h=10}$ für [K], [M] bzw. [R] hervor.

Die mit E4 (2,4fach höhere Q als E2) ansteigende Strahlleistung $e_{s,h=0}$ wird offenbar, insbesondere im Strahlkern [K], durch die Reibungs- und Dämpfungseffekte kompensiert, wodurch die $E_{s,ve,h=10}$ als Resultat um das 1,8-, 5,5- bzw. 29,9fache höher ansteigt als mit E2 für die jeweilige Teilfläche [K], [M] und [R].

Wird die $E_{s,K,ve,h=10}$ der Strahlen unter Einsatz von E4 statt E1 betrachtet, so ist ein Abfall der $E_{s,K,ve}$ um ca. 83% bei $p = 3$ bar und um 37% bei $p = 8$ bar zu verzeichnen. Die Reduktion der $E_{s,M,ve,h=10}$ fällt hingegen mit 15% nicht so ausgeprägt aus wie die $E_{s,K,ve,h=10}$.

Die entsprechende Spritzdruckerhöhung bewirkt bei E4, trotz einhergehender progressiver Vergrößerung der $e_{s,h=0}$, auch eine nicht signifikante Steigerung der $E_{s,K,ve}$ ($0,74 \leq E_{s,K,ve,h=10} \leq 0,79$). Die Begründung dieses als gering zu verzeichnenden Anstiegs bei E4 liegt, wie im vorausgegangenen Abschnitt erläutert, einerseits in der verzögernden Wirkung der gegensei-

tigen Beeinflussung einzelner Strahlsegmente der dichten Strahlen, andererseits im mit der t_a in der Abtragsspur progressiv anwachsenden Dämpfungseffekt.

Betrachtet man zusammenfassend die $b_{s,l,ae}$ der Strahlen bei steigendem d_d , so nähert sich die $b_{s,l,ae}$ der Spritzbreite $b_{s,l}$ bei gleichen Spritzbedingungen. Dieser sich einstellende Maximalwert des teilflächenbezogenen ξ_{ae} ist auf eine mit dem d_d ansteigenden Strahlstabilität und folglich auf die Bildung einer gesättigten Strahlzone zurückzuführen. Dies hat in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter ab einem Grenzwert der Strahldichte bzw. Volumenstromrate Q bzw. d_d einen Abfall der teilflächenbezogenen $E_{s,ve}$ zur Folge. Außerdem wird die Q von 4 l min^{-1} als minimalen Grenzwert für die Ausbildung eines effektiven und effizienten Abtragsstrahls angenommen. In Abhängigkeit von h_a sinkt die teilflächenbezogene $E_{s,ve,h=10}$ auch mit der Vergrößerung eines bestimmten Spritzdruckes p .

h_a von 20 cm

Um die funktionellen Zusammenhänge erweitert analysieren zu können, werden die teilflächenbezogenen Charakteristiken der Strahlen in 20 cm h_a und deren Abtragseffektivität und Effizienz in Variation der Spritzbedingungen in **Anhang C, Tabelle C2** bzw. **Bild 5.13** und **Bild 5.14** aufbereitet dargestellt.

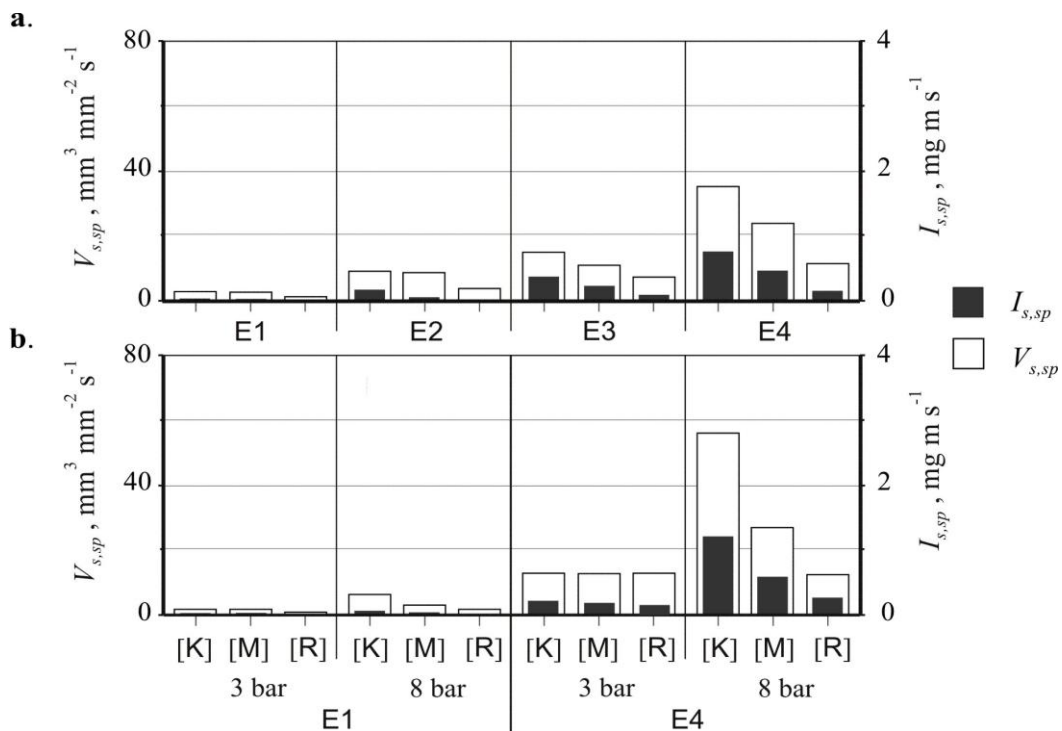


Bild 5.13 Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ bei $h_a = 20 \text{ cm}$ und Vergrößerung des h_a von 10 auf 20 mm und $d_d = 0,75$ bis 1,7 mm bei $p = 5 \text{ bar}$ (a) und bei Druckanstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b)

Einhergehend mit der Vergrößerung des h_a von 10 auf 20 cm kommt es, wie in **Abschnitt 5.1** dargestellt, zu einer radialen Ausweitung des Strahls, die sich in einer verringerten $C_{s,sp}$ und $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen in allen Strahlteilflächen bemerkbar macht.

Bei den Strahlen für Düsen mit kleinerem d_d fällt die Strahlleistungseinbuße mit entsprechender Anhebung des h_a wesentlich deutlicher aus.

Gegenüber des $h_a = 10$ cm beträgt die erzielte $I_{s,sp,h=20}$ im Strahlkern [K] zwischen 40 bis 58% für E1 und 45 bis 70% für E4 unter Variation des p von 3 bis 8 bar. Für E3 liegt der entsprechende Wert unter p von 5 bar bei 63% (vgl. **Bild 5.11** und **Bild 5.13**).

Bei E1 in 20 cm h_a ist bei Betrachtung von **Bild 5.14**, außer der bei E1K28 erfassten kleinen $A_{ae,K}$ ($\xi_{ae,K,h=20} = 0,2$), keine messbare A_{ae} bei den untersuchten Spritzdrücken zu verzeichnen. Es findet nur noch ein oberflächennahes Abtragen statt.

Zwar ist unter Einsatz aller Düsen, abgesehen von E1, eine Steigerung der A_a bei der Verdopplung des h_a auf 20 cm zu beobachten, dennoch erfolgt die effektive Abtragung durch die Strahlen mit $Q \leq 6,2 \text{ l min}^{-1}$, wie bei E3 unter $p = 5$ bar, im Wesentlichen im Strahlkern [K].

Folglich verschieben sich mit Verdopplung des h_a auf 20 cm die Mindestwerte für die Q bzw. den d_d als Bedingung für eine energetisch günstige Strahlabbildung zum größeren Wert.

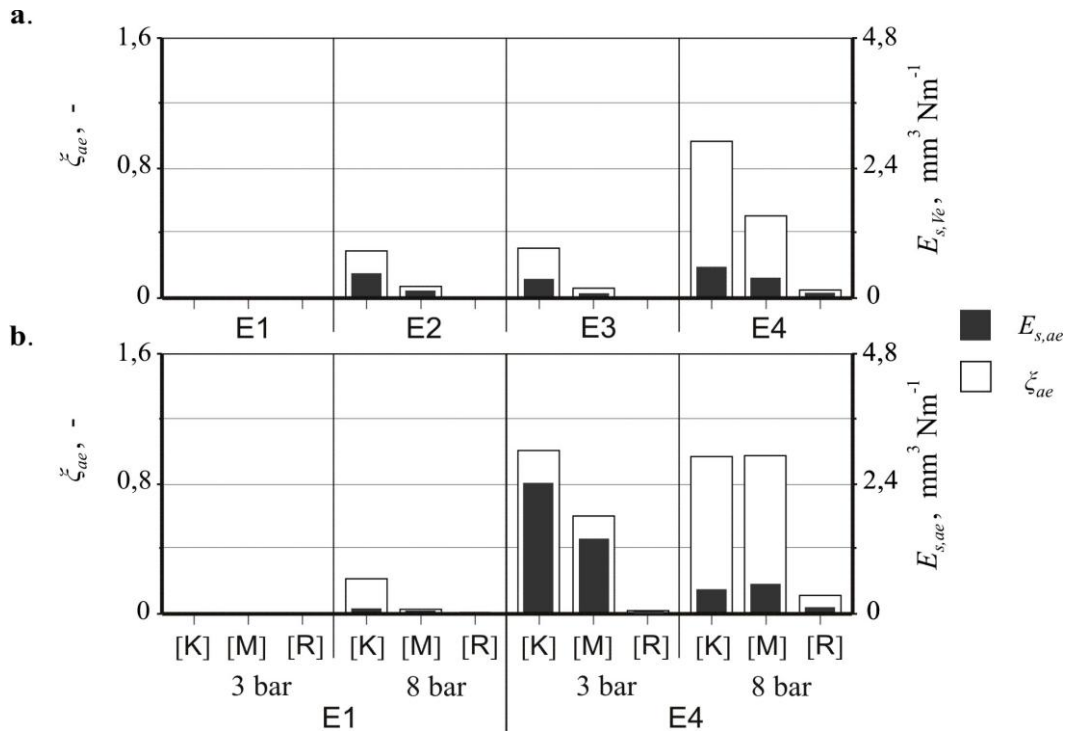


Bild 5.14 Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der ξ_{ae} und der $E_{s,ve}$ bei $h_a = 20$ cm und Vergrößerung des d_d von 0,75 bis 1,7 mm bei $p = 5$ bar (a) und bei Spritzdruck anstieg von 3 auf 8 bar mit E1 und E4 (b)

Im Verlauf der teilflächenbezogenen ξ_{ae} und $E_{s,ve}$ der Strahlen machen sich Veränderungen bemerkbar, die mit zunehmender radialer Entfernung $r_{s,h=20}$ vom [K] stärker abfällt. Das bedeutet, der Bedarf der $e_{s,h=0}$ nimmt mit steigender Entfernung von der Strahlachse deutlich zu. E3 erzeugt beispielsweise bei $p = 5$ bar einen Strahl mit $b_{s,l,ae,h=20}$ bis 30,5 mm (-25,4 mm bzw. +5,1 mm von Strahlachse; maximaler $\theta_{s,ae,h=20} = 82,8^\circ$) bei einer $b_{s,l}$ von 416 mm. Dies bedeutet eine Abnahme der $b_{s,l,ae}$ auf 0,19fach der $b_{s,l,ae,h=10}$. Das $\xi_{ae,K,h=20}$ der Strahlen bei E3, wie bei E2, lässt sich beispielsweise bei $p = 5$ bar in ähnlichen Dimensionen bestimmen

($\xi_{ae,K,h=20} = 0,3$). Die mit diesen Düsen erzeugten Strahlen sind demzufolge ab Strahlzone in der [M] uneffektiv, dies entspricht einem unwirksamen Strahlvolumenanteil von über 60%. Das Verhältnis teilflächenbezogener Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ [K] : [M] : [R] bei E3 unter $p = 5$ bar verschiebt sich mit der Verdopplung des h_a auf 20 cm von 4,5 : 3,6 : 1 hin zu 4,7 : 1 (ohne effektiven Abtrag im [R] bei $h_a = 20$ cm).

Bei den mit E4 unter $p = 5$ bar erzeugten Strahlen, abgesehen vom Strahlkern [K], kommt es in [M] und [R] bei Anhebung des h_a auf 20 cm zwar zu einer Reduktion der A_{ae} und damit der Flächenratio ξ_{ae} , diese fällt jedoch nicht so deutlich aus, wie mit E3 (vgl. **Bild 5.12 a** und **Bild 5.14 a**).

Vergleicht man die teilflächenbezogene ξ_{ae} der Strahlen mit E4 bei entsprechender Verdopplung des h_a von 10 auf 20 cm miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

Festzustellen ist, dass sich bei entsprechender Abstandsverdopplung deutlich höhere Strahlvolumenanteile in [R] konzentrieren. Bei einem $p = 3$ bar ist eine Steigerung des Volumenanteils in [R] ca. um den Faktor 5 zu verzeichnen. Die weitere Erhöhung des p auf 5 bzw. 8 bar ruft tendenziell eine Zunahme des Volumenanteils in [K] hervor, wodurch der Volumenanteil in [R] als Resultat nur um den Faktor 4 ($p = 5$ bar) bzw. 2 ($p = 8$ bar) ansteigt.

Betrachtet man die $b_{s,l,ae,h=20}$ gegenüber der $b_{s,l,ae,h=10}$ bei E4, so lassen sich bei beiden h_a unter p von 3 bar (119,4 mm bei $h_a = 10$ cm und 106,7 mm bei $h_a = 20$ cm; maximaler $\theta_{s,ae,h=20} = 74,1^\circ$) bzw. von 5 bar (175,3 mm bei $h_a = 10$ cm und 152,4 mm bei $h_a = 20$ cm; maximaler $\theta_{s,ae,h=20} = 67,2^\circ$) und von 8 bar (157,5 mm bei $h_a = 10$ cm und 177,8 mm bei $h_a = 20$ cm) $b_{s,l,ae}$ in ähnlichen Dimensionen bestimmen, jedoch mit unterschiedlichen Spritzbreiten $b_{s,l}$ der Strahlen (vgl. **Tabelle 5.1**).

Zu beobachten ist hier, dass die Leistungseinbuße der Arbeitsabstandsanhebung tendenziell durch den erhöhten p von 8 bar kompensiert wird. Dies beschränkt sich jedoch vorwiegend auf die [M] und den [R]. Zwar äußert sich der ansteigende p in einer zum [R] hin verstärkten Strahlwirkung, dennoch wird dieser Effekt von einer zum [R] hin intensiven Verringerung der Tropfengrößen und der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ von wirksamen Tropfen überlagert. Dies äußert sich in einer Reduktion der Materialbeanspruchung in [M] und [R].

Die $\xi_{ae,K,h=20}$ der Strahlen mit E4 nimmt nahezu konstante Werte an (0,96 bis 0,99), während sich die $\xi_{ae,M}$ bei $p = 3$ bar von 1,2 um ca. 50% auf 0,6 bzw. bei $p = 5$ bar von 1,33 um ca. 37% auf 0,5 verringert. Bei $p = 8$ bar lässt sich bei beiden h_a eine $\xi_{ae,M}$ in ähnlichen Dimensionen bestimmen ($\xi_{ae,M} = 0,97$). Beim Flächenratio $\xi_{ae,R}$ für den [R], wo bei der Abstandsverdopplung eine Vergrößerung der Strahlteilfläche [R] um den Faktor 8 bis 10 stattfindet, beträgt die Reduktion im Fall von $p = 3$ bar ca. 40% und steigert sich unter $p = 5$ bar bis zu 95% (von 0,9 auf 0,1). Mit der weiteren Erhöhung des p auf 8 bar ist zwar eine leichte Steigerung der $A_{aeR,h=20}$ gegenüber der $A_{aeR,h=10}$ zu verzeichnen, dennoch beträgt die $\xi_{ae,R,h=20}$ nur ca. 0,44-fach der $\xi_{ae,R,h=10}$ (0,24 für $h_a = 10$ cm bzw. 0,11 für $h_a = 20$ cm).

Wird die teilflächenbezogene Abtragseffizienz $E_{s,ve,h=20}$ der Strahlen mit E4 verglichen, so

variiert das Ergebnis der Druckänderung von 3 bis 8 bar bezüglich der teilflächenbezogenen $E_{s,ve,h=20}$ im Unterschied zum $h_a = 10$ cm deutlich.

In **Bild 5.14 b** ist zu erkennen, dass mit **E4** unter $p = 3$ bar die größeren Werte der $E_{s,ve,h=20}$ für den [K] ($2,4 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$) und die [M] ($1,4 \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$) erzielt werden. Dies bedeutet eine Zunahme der $E_{s,ve,h=20}$ auf das 3,2fache bzw. das 1,6fache der $E_{s,ve,h=10}$. Die $E_{s,ve,h=20}$ sinkt hingegen bei $p = 5$ bar um 0,3-, 0,6- und 0,9fach für [K], [M] bzw. [R] und bei $p = 8$ bar um 0,4fach für [K]. Bei weiterer Druckerhöhung auf $p = 8$ bar erhöht sich $E_{s,ve,h=20}$ in [M] (1,2fach) und [R] (1,8fach) im Vergleich zu $E_{s,ve,h=10}$ (vgl. **Bild 5.12 b**). Dieses wird bei der Betrachtung der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen anschaulich (vgl. **Bild 5.11** und **Bild 5.13**).

Im Fall von $p = 3$ bar sinkt die teilflächenbezogene $I_{s,sp,h=20}$ bei **E4** gegenüber der $I_{s,sp,h=10}$ in ähnlichen Dimensionen (45% für [K], 40% für [M] und 47% [R]). Demnach ergibt sich bei der Arbeitsabstandsverdopplung trotz einhergehender Vergrößerung des Strahlvolumenanteils im [R] ein nahezu ähnliches Verhältnis der $I_{s,sp,h=20}$ zwischen den Teilflächen [K] : [M] : [R] ($2,1 : 1,3 : 1$) wie bei $h_a = 10$ cm ($2,2 : 1,6 : 1$). Bei Anstieg des p auf 5 bar und Anhebung des h_a auf 20 cm ist eine tendenziell zum [R] hin verstärkte Reduktion der teilflächenbezogenen $I_{s,sp,h=20}$ zu verzeichnen. Das bedeutet, der Unterschied der $I_{s,sp,h=20}$ zwischen den Teilflächen ist stärker ausgeprägt ($5,7 : 3,4 : 1$) als bei $h_a = 10$ cm ($4,4 : 2,2 : 1$).

Während sich bei $p = 5$ bar die $I_{s,sp,h=20}$ auf das 0,54-, 0,64- und 0,41fache der $I_{s,sp,h=10}$ bei der jeweiligen Strahlteilfläche [K], [M] bzw. [R] verringert, fällt der Abfall der teilflächenbezogenen $I_{s,sp}$ bei $p = 8$ bar und $h_a = 20$ cm mit 68% für [K], 60% für [M] und 46% für [R] vergleichbar geringer aus. Bei $p = 8$ bar nimmt die Variationsbreite der $I_{s,sp,h=20}$ zwischen den Teilflächen ($4,8 : 2,3 : 1$) ab, wobei tendenziell eine zum [K] hin größer werdende Kompensierung der Leistungseinbuße der Strahlverlängerung stattfindet.

Die Abtragseffizienz $E_{s,ve,h=20}$ kommt bei der Erhöhung des p auf 5 bzw. 8 bar nicht so ausgeprägt zur Geltung wie bei $p = 3$ bar, wobei zunächst bei $p = 8$ bar eine leichte Steigerung der $E_{s,ve,h=20}$, gegenüber der $E_{s,ve,h=10}$, für die [M] zu verzeichnen ist. In der [M] und im [R] kommt es zur kennzeichnenden Reduktion der effektiven Abtragstiefe t_{ae} , da einhergehend mit verringerter Belastungsintensität und -höhe bzw. $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen die Leistungseinbuße der Strahlverlängerung durch die erhöhten Tropfenschlagkomponente nicht ausreichend kompensiert wird. Der standardisierte Testkörper wird daher durch die [M] und den [R] des mit **E2** bzw. **E3** erzeugten Strahls schwach dynamisch beansprucht ($\xi_{ae,h=20} \leq 0,1$).

Bei **E4** in $h_a = 20$ cm erfolgt unter $p = 3$ bar eine effizientere Materialabtragung im [K] und [M] als bei $h_a = 10$ cm. Einhergehend mit der Vergrößerung des h_a findet eine Verschiebung der Wirkmechanismen bedingt durch Strahldruckbelastungen (vgl. **Abschnitt 3.2.4**) statt. Dies ist wiederum mit einer Abnahme des zusammenhängenden Strahlteils mit eingehender Reduktion des erosiven Anteils sowie einer Verringerung der Strahlbelastung bzw. der Impulsintensität $I_{s,sp}$ im [M] und [R] durch hydrodynamische Kräfte sowie Wechselwirkung mit der umgebenden Luft (vgl. **Abschnitt 3.2.1**) verbunden.

5.2.1.2 Flachstrahldüsen, $\theta_{s,h=0} = 60^\circ$

Das weitere Untersuchungsspektrum von Wasserstrahlen beruht hier auf die Anpassung der Düsenkonfiguration zur Steigerung des Effektivitätsgrads bzw. der Strahleffizienz im Hinblick auf die Wasser- und Energieeinsparung während des Strahlabtrags. Dabei wird folgend der Effekt des verringerten Strahlwinkels $\theta_{s,h=0}$ von Flachstrahldüsen bezüglich der Makro- bzw. Mikrostruktur und des Wirkungsgrades des Wasserstrahls, insbesondere in der Strahlmitte [M] und im Strahlrand [R] auf der Aufprallfläche analysiert.

In **Bild 5.15** sind die Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ der mit E5 bei $p = 5$ bar gebildeten Wasserstrahlen in h_a von 10 und 20 cm dargestellt im Vergleich zu Strahlen mit E3 und E4.

Vergleicht man die Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ von Flachstrahldüsen bei $p = 5$ bar, so fällt auf, dass mit abnehmendem Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$ von 90° auf 60° bei konstanten Spritzbedingungen eine starke Zunahme der Volumenanteile der größeren Tropfenklassen zu erkennen ist.

Bei $h_a = 10$ cm stellt sich unter Einsatz von E5 statt E4 eine Verschiebung der maximalen Tropfengrößen von 0,9 mm hin zu 2,5 mm (bis 59% vom gesamten Strahlvolumen) sowie bei $h_s = 20$ cm hin zu 1,8 mm (bis 37% des gesamten Strahlvolumens) ein.

Bei den Düsen mit kleinerem d_d (E4 und E3, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) in h_a von 10 und 20 cm sind unter konstanten Spritzbedingungen deutlich erhöhte Volumenanteile der Kleintropfen bis 0,3 mm zu verzeichnen. Während bei den mit E5 bei $p = 5$ bar ausgebildeten Wasserstrahlen die teilflächenbezogenen Volumenanteile der Kleintropfen in h_a von 10 und 20 cm mit 6,3 bzw. 10,3% relativ geringer ausfallen, nehmen sie bei E4 und E3 in $h_a = 10$ cm 3- bzw. 5,3fach und in $h_a = 20$ cm 1,7- bzw. 2,9fach höhere Werte an.

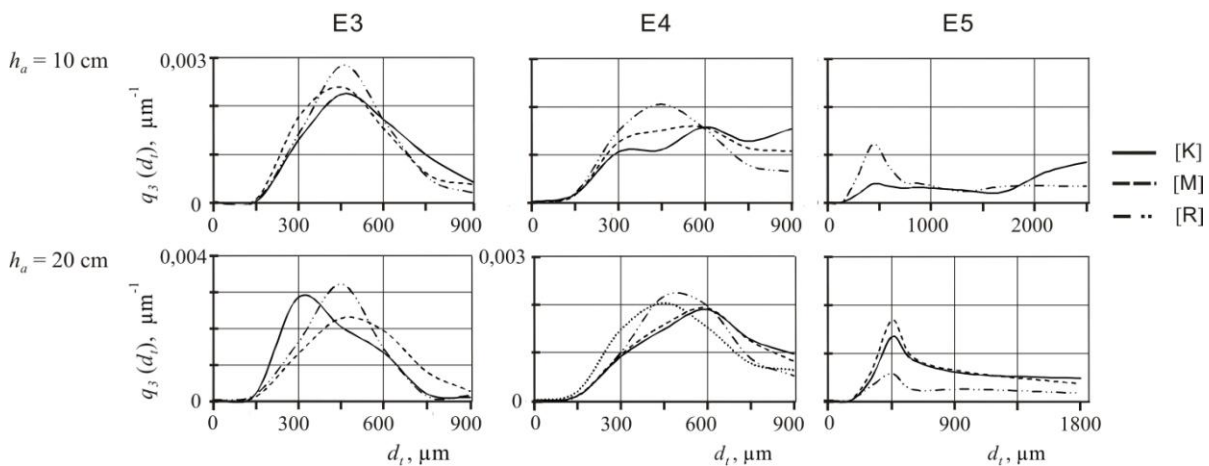


Bild 5.15 Abhängigkeit der teilflächenbezogenen Verteilungsdichte $q_3(d_t)$ von Strahlen in h_a von 10 und 20 cm bei $p = 5$ bar von Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$ und d_d (E3, E4 und E5)

Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass mit der Zunahme der Tropfengröße bei den mit E5 gebildeten Strahlen, die mittlere Tropfengeschwindigkeit v_t ähnliche Größenordnung wie die bei E3 und E4 aufweist.

Die teilflächenbezogenen ([K], [M] und [R]) Mittelwerte der Tropfengeschwindigkeit $v_{t,h=10}$ und $v_{t,h=20}$ bei den mit E5 unter $p = 5$ bar ausgebildeten Strahlen liegt bei [K] 20,2 (13,8 bis

25,1 m s⁻¹) und [R] 14,6 m s⁻¹ (5,5 bis 22,2 m s⁻¹) bzw. bei [K] 20,9 (8,3 bis 27,8 m s⁻¹), [M] 20,3 (1,8 bis 27,8 m s⁻¹) und [R] 17,4 m s⁻¹ (9,5 bis 23,7 m s⁻¹).

Mit E4 und E3 betragen die teilflächenbezogene Wertespektren der $v_{t,h=10}$ zwischen 22,5 bis 28,2 m s⁻¹, 20,7 bis 26,7 m s⁻¹ und 3,3 bis 20,7 m s⁻¹ ($\infty = 25,3$ m s⁻¹, 24,8 m s⁻¹ und 18,9 m s⁻¹) bzw. zwischen 12,1 bis 28,2 m s⁻¹, 5,2 bis 22,1 m s⁻¹ und 1,1 bis 22,4 m s⁻¹ ($\infty = 25,3$ m s⁻¹, 25,3 m s⁻¹ und 25,3 m s⁻¹). Die Mittelwerte der $v_{t,h=20}$ wiesen gegenüber E5 eine um 1,2- und 1,1- und 0,9fach (13,8 bis 26,4 m s⁻¹, 10,7 bis 24,8 m s⁻¹ und 4,1 bis 18,5 m s⁻¹) bzw. um 1,1-, 0,9- und 1,0fach erhöhte bzw. ähnliche v_t auf.

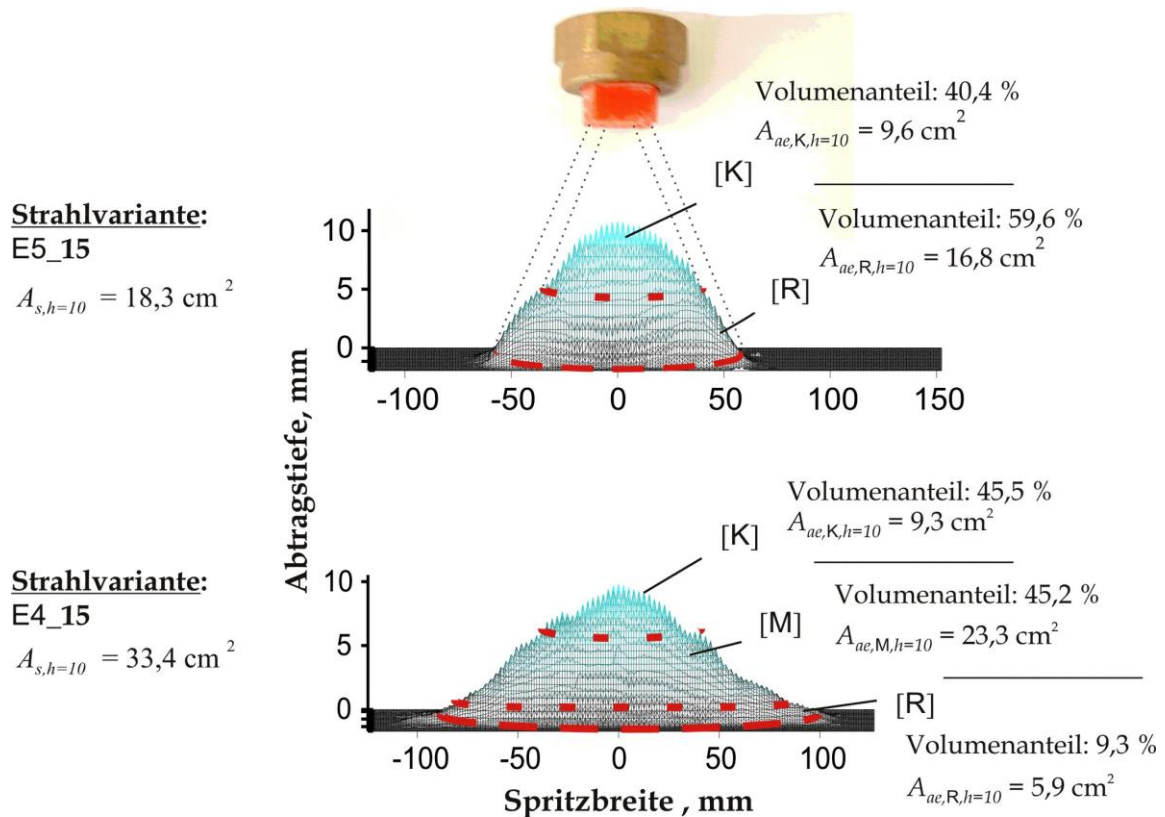
Obwohl es mit dem abnehmenden $\theta_{s,h=0}$ von 90 auf 60°, außer der leicht steigenden Werte im [R], zu keiner kennzeichnenden Steigerung der v_t gleicher Tropfengrößenklassen kommt, nehmen jedoch die Impulspotentiale I_t der Tropfengrößen $d_t > 0,9$ mm mit eingehender Zunahme der Tropfenmasse zu (vgl. **Gleichung 4.1**) zu. Außerdem ruft ein abnehmender $\theta_{s,h=0}$ eine Verringerung der A_s hervor (**Bild 5.16**), die sich in einer erhöhten teilflächenbezogenen $V_{s,sp}$ und $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen äußert (**Bild 5.17**). Es stellen sich mit E7 bei $p = 5$ bar im [K] 1,0fache und im [M] 2,6fach höhere $V_{s,sp,h=10}$ sowie 1,6-, 2,2- und 3,4fach höhere $V_{s,sp,h=20}$ der Wasserstrahlen im Vergleich zu E4 ein. Zugleich weisen mit E7 die teilflächenbezogenen $I_{s,sp,h=10}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen im [K] auf das 0,3fach niedrige und im [M] 0,7fach höhere der $I_{s,sp,h=10}$ unter dem Einsatz von E4 auf. Sie liegen um 1,5-, 1,7- bzw. 4,2fach höher gegenüber den mit E4.

Vergleicht man die Abtragsergebnisse der Strahlvarianten mit E4 und E5 auf den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten (vgl. **Bild 5.12**, **Bild 5.16** und **Bild 5.17**) unter konstanten Spritzbedingungen, so fällt auf, dass mit abnehmendem $\theta_{s,h=0}$ bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit die $V_{s,sp}$ und die $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen, insbesondere am [R], zunimmt, was zu einem Ansteigen der auf den abzutragenden Standardtestkörper gebrachten Strahlenergie e_s führt. Dabei wirkt sich jedoch der verringerte $\theta_{s,h=0}$ von 90 auf 60° bei $h_a = 10$ cm weniger aus als bei $h_a = 20$ cm, was aufgrund gesteigerter Strahldichte, insbesondere im [K], am erhöhten Grad der Interaktion und somit an gesteigerten Reibungs- und Dämpfungsverlustanteilen liegen dürfte (vgl. **Abschnitt 3.2.2**).

Zusätzlich steigert sich durch Reduktion des $\theta_{s,h=0}$ die Staudruckbeanspruchungen bei $h_a = 10$ cm (vgl. **Abschnitt 3.2.3**). Außerdem nehmen mit steigender t_a auch die Reibungs- und Dämpfungsverluste in Abtragvertiefungen zu. So muss der Abtragstrahl eine höhere mittlere Strahlenergie e_s zur Verfügung stellen, um Abtragmaterial vom Standardtestkörper herauszulösen.

Der direkte Vergleich nach **Bild 5.16** zeigt, dass im [K] für die mit E5 ausgebildeten Strahlen bei $p = 5$ bar und $h_a = 10$ cm keine signifikante Steigerung der mittleren t_{ae} ($t_{ae} = 8,8$ mm) gegenüber der mit E4 ($t_{ae} = 8,9$ mm) verzeichnet wurden. Im [R] ist jedoch der Anstieg der t_{ae} von 0,9 mm (E4) auf 3,7 mm (E5) deutlicher. Bei einer Absenkung des p von 5 auf 3 bar und $h_a = 10$ cm fällt mit E5 hingegen der t_{ae} -Anstieg im [K] von 3,4 mm auf 5,1 mm und im [R] von 2,5 mm auf 3,0 mm wesentlich deutlicher aus. Zu erkennen ist auch, dass mit E5 die mittleren teilflächenbezogenen t_{ae} der Wasserstrahlen bei $p = 5$ bar und $h_a = 20$ cm gegenüber

der mit E4 um 1,4-, 1,2- und 1,1fach ansteigen (vgl. **Anhang C, Tabelle C3**).



Strahlvarianten	E4_15	E5_15	E4_25	E5_25
$\theta_{s,ae}$	48,8°	59,0°	67,2°	69,8°
A_{ae}	38,4 cm ²	26,4 cm ²	30,8 cm ²	25,1 cm ²

Bild 5.16 Verteilungen der t_a durch Strahlen bei $h_a = 10 \text{ cm}$ und $p = 5 \text{ bar}$ für E5 ($\theta_{s,h=0} = 60^\circ$) und E4 ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) sowie Gegenüberstellung der A_s , teilflächenbezogenen Strahlvolumenanteile, $\theta_{s,ae}$, und A_{ae} für Strahlvarianten mit den Düsen unten gleichen Spritzbedingungen

Die Flächenratio $\xi_{ae,h=10}$ für den effektiven Materialabtrag durch die mit E5 bei $p = 5 \text{ bar}$ ausgebildeten Strahlen liegt bei 1,0 für den [K] und 1,9 für die [R]. Daraus wird ersichtlich, dass die erhöhte Staudruckwirkung als quasistatische Belastung bei radialem Abströmen der Strahlflüssigkeit eine 1,44fache Vergrößerung der A_{ae} gegenüber der A_s hervorruft.

Die teilflächenbezogen Strahlen von E5 zeichnen sich unter gleichen Spritzbedingungen durch eine 1,1-, 2,5- und 1,8fach höhere $\xi_{ae,h=20}$ aus. Die $A_{ae,h=20}$ liegt unter gleichen Spritzbedingungen im Bereich von 0,96fach der $A_{s,h=20}$. Dies entspricht einem abtragswirksamen Strahlvolumenanteil über 90% (vgl. **Bild 5.16**).

Zwar äußert sich der verringerte $\theta_{s,h=0}$ bei E5 in einer zum [R] hin anwachsenden Abtragstrahlwirkung, dennoch wird dieser Effekt von den geringen Werten der $E_{s,ve}$ überlagert. Die $E_{s,ve}$ der Wasserstrahlen bei beiden h_a ändert sich gegenüber der mit E4 unwesentlich und liegt daher der optimale Betriebspunkt von E5 bei $h_a > 20 \text{ cm}$ vor.

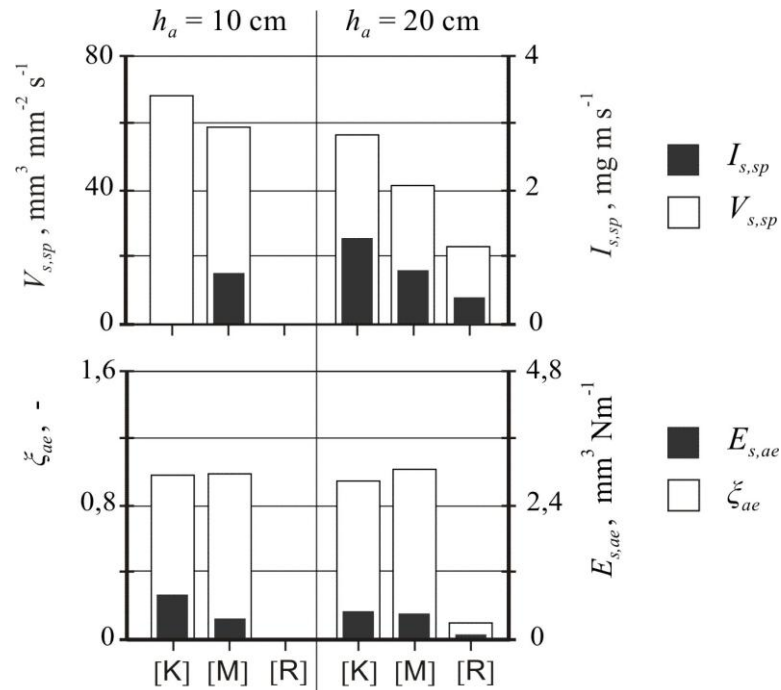


Bild 5.17 Veränderungen der teilflächenbezogenen Mittelwerte der Flächenratio ξ_{ae} und der Abtragseffizienz $E_{s,ve}$ der Strahlen mit E5, bei $p = 5$ bar und in h_a von 10 und 20 cm

Es kann somit festgestellt werden, dass der Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$ und damit die A_{ae} mit einem Arbeitsabstand h_a bzw. bestimmter Vorschubgeschwindigkeit im Zusammenhang mit den Prozessparametern d_d und p bzw. Q korreliert werden muss, so dass bei jeder Niederdruckdüse optimale Abtragseffektivität und Effizienz der Wasserstrahlen erzielt wird.

5.2.1.3 Vollkegeldüsen

Um eine grundlegende Charakterisierung der Makro- sowie Mikrostrukturen bzw. über das Abtragungspotential von Wasserstrahlen mit Vollkegeldüsen zu erhalten, wurde unter Verwendung von E7 und E8 bei $p = 5$ bar die Ausbildung der Strahlen in $h_a = 10$ cm untersucht.

Im Folgenden werden die Abtragungsergebnisse der Strahlen auf standardisierte Sand-Binde-mittelgemisch-Platten zusammengefasst erläutert.

Bild 5.18 zeigt die teilflächenbezogenen Mittelwerte der $V_{s,sp,h=10}$ und $I_{s,sp,h=10}$ für verschiedene Düsen E3 und E7 mit vergleichbarer Q bei einem konstanten $p = 5$ bar.

In einer überschlägigen Gegenüberstellung der düsentypbezogenen Strahldaten ist festzustellen, dass unter Anwendung von E7 (Vollkegeldüse; $Q = 6,6 \text{ l min}^{-1}$) anstatt von E3 (Flachstrahldüse; $Q = 6,2 \text{ l min}^{-1}$) die kleineren $V_{s,sp}$ des Strahls und folglich die geringeren $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfen erzielt werden. Es stellen sich mit E7 0,1 bis 0,3fach geringere teilflächenbezogene $V_{s,sp,h=10}$ des Strahls im Vergleich zu E3 ein.

Zugleich sinken mit E7 die teilflächenbezogenen $I_{s,sp,h=10}$ der abtragungswirksamen Tropfen auf das 0,1 bis 0,2fache der $I_{s,sp,h=10}$ von E3. Erklärbar wird diese sich unter dem Einsatz von E7 ergebende Reduktion der o.g. Strahlparameter mit der vergrößerten Strahlfläche A_s . Die E7 erzeugt beispielsweise bei $p = 5$ bar einen Strahl mit einer $A_{s,h=10}$ von $243,2 \text{ cm}^2$. Dies bedeu-

tet eine Vergrößerung des $A_{s,h=10}$ auf das 7,6fache von E3 ($32,2 \text{ cm}^2$). Infolgedessen bewirkt die für den Strahlzerfall günstigere größere Strahldivergenz eine Verringerung des Tropfengrößenspektrums bei gleichzeitiger Reduktion der Einzeltropfenbelastung.

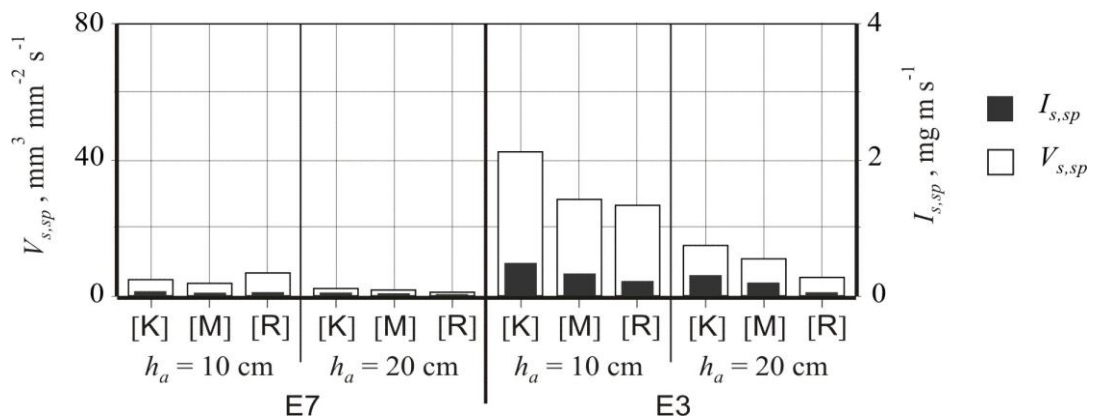


Bild 5.18 Gegenüberstellung der teilflächenbezogenen Mittelwerte der $V_{s,sp}$ und der $I_{s,sp}$ in $h_a = 10$ und 20 cm für die Düsen E3 (Flachstrahl) und E7 (Vollkegel) bei $p = 5 \text{ bar}$

Zur Charakterisierung des Abtragsstrahlverhaltens von Strahlen mit E7 konnten wegen der großen Strahlfläche $A_{s,h=10}$ keine stabilen Standardtestkörper hergestellt werden.

Zur Veranschaulichung der düsentypbezogenen Unterschiede im Abtragsverhalten werden die Materialabtragungen durch Strahlen mit den kleineren Düsen E2 (Flachstrahldüse; $Q = 4,1 \text{ l min}^{-1}$) und E8 (Vollkegeldüse; $Q = 4,6 \text{ l min}^{-1}$) mit vergleichbarer Volumenstromrate Q herangezogen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 5.19 dargestellt.

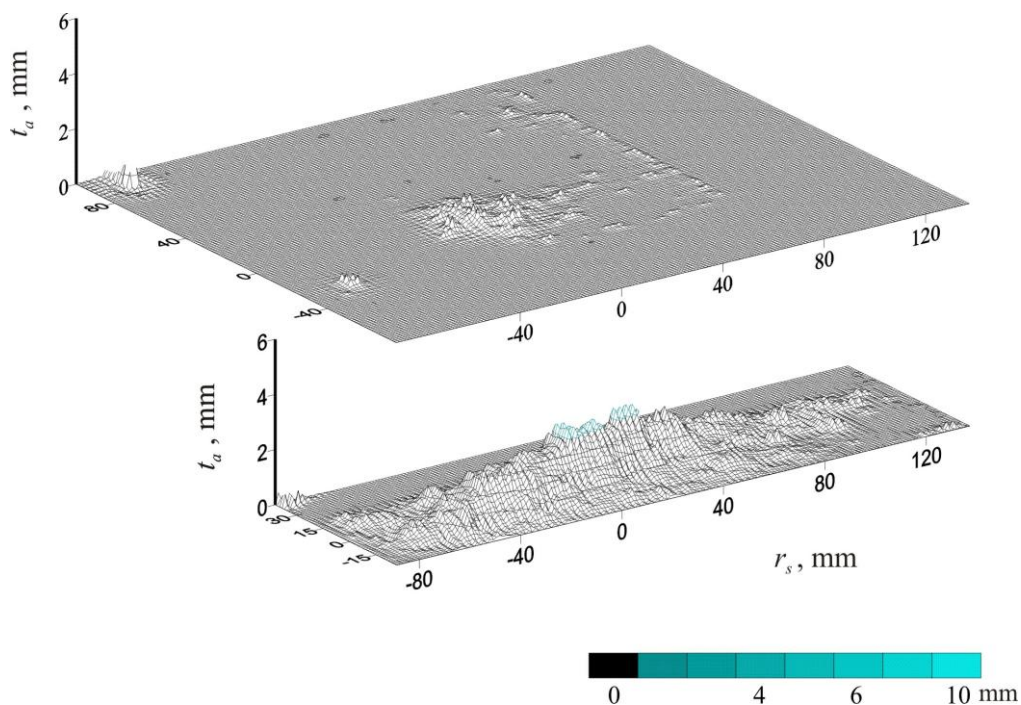


Bild 5.19 Vergleich von Verteilungen der Abtragtiefe t_a auf standardisierte Testkörper durch Strahlbeanspruchungen mit E8 (oben) und E2 (unten) bei $p = 5 \text{ bar}$ und $h_a = 10 \text{ cm}$

Bei den Untersuchungen mit den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten nach Beanspruchung mit E2 bzw. E8 und 5 bar p zeigt sich, dass die Materialabtragung unter dem Einsatz von E8 durch einen unbeeinflussten [K], radialsymmetrisch von vereinzelt oberflächennahen Abtragsvertiefungen umgeben, gekennzeichnet ist ($b_{s,l}$: -78,7 mm bzw. +78,7 mm von Strahlachse; $A_{s,ae,h=10} = 2,8 \text{ cm}^2$).

Durch den Einsatz von E2 kommt es zur großflächigen Materialabtragung ($b_{s,l}$: -124,5 mm bzw. +149,9 mm von Strahlachse; $A_{s,ae,h=10} = 45,2 \text{ cm}^2$). Somit liegt bei Flachstrahldüsen ein deutlicher energetischer Vorteil für das Strahlabtragen vor.

Aus dem geschilderten Unterschied wird deutlich, dass unter Anwendung von E8 statt von E2 trotz der nahezu gleichen Q bei gleichem p die spezifische Impulsintensität $I_{s,sp}$ bzw. Materialbelastung und damit die Abtragvolumina wesentlich geringer ausfällt. Somit kann festgestellt werden, dass die Flachstrahldüsen bei vergleichbaren Betriebsbedingungen für einen effizienten und wirtschaftlichen Einsatz geeigneter sind als die Vollkegeldüsen.

5.2.1.4 Regressionsanalyse der erzielten Strahlraten

In vorangegangenen Abschnitten sind die funktionalen Zusammenhänge zwischen den unter Variation von Düsen- und Betriebsparametern teilflächenbezogen ausgebildeten Makro- sowie Mikrostrukturen des Strahls und der Strahldruckbelastung bzw. dem daraus resultierenden Abtragungspotential erläutert.

Die statistische Regressionsanalyse der erzielten Strahlparameter (vgl. **Anhang C, Tabelle C1 bis C4**) wird nachfolgend interpretiert, um die Einflüsse von verschiedenen Parametern auf die Abtragseffektivität und Strahleffizienz abzuschätzen.

In **Anhang C, Bild C1 bis C2** wird teilflächenbezogen die lineare Beziehung zwischen den betrachteten Strahlparametern (P_{max} bzw. t_a über $I_{s,sp}$) bei verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern p , d_d und h_a veranschaulicht.

Tabelle 5.6 zeigt, dass zwischen den Regressionsgeraden für die teilflächenbezogenen ([K] [M] und [R]) Streudiagramme der vorgegebenen Strahlparameter (t_a und $I_{s,sp}$) eine Streuung in der Steigung a existiert.

Tabelle 5.6 Arbeitsabstand- und teilflächenbezogene Korrelationen zwischen den erzielten Strahlparameter; Abtragstiefe t_a , Impulsintensität $I_{s,sp}$, sowie die gefundenen Regressionskoeffizienten $R(I_{s,sp}, t_a)$ und Steigungen a der Ausgleichsgeraden

p , bar	h_a , cm	lineare Regressionsfunktion			
		Regressionsgleichung	für jeweilige Strahlteilfläche	$R(I_{s,sp}, t_a)$	a
3, 5, 8	10	$t_a = 4,8 I_{s,sp} + 0,6$ $R^2 = 0,73$	[K]	0,96	5,8
			[M]	0,81	2,0
			[R]	0,53	0,8
	20	$t_a = 3,3 I_{s,sp} + 0,6$ $R^2 = 0,81$	[K]	0,94	3,7
			[M]	0,87	2,2
			[R]	0,51	0,7

In **Bild 5.20** sind die rechnerischen Trendlinien mit der Annahme einer exponentiellen Abhängigkeit der teilflächenbezogenen Messdaten der t_a von der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ für den jeweiligen Arbeitsabstand h_a eingetragen.

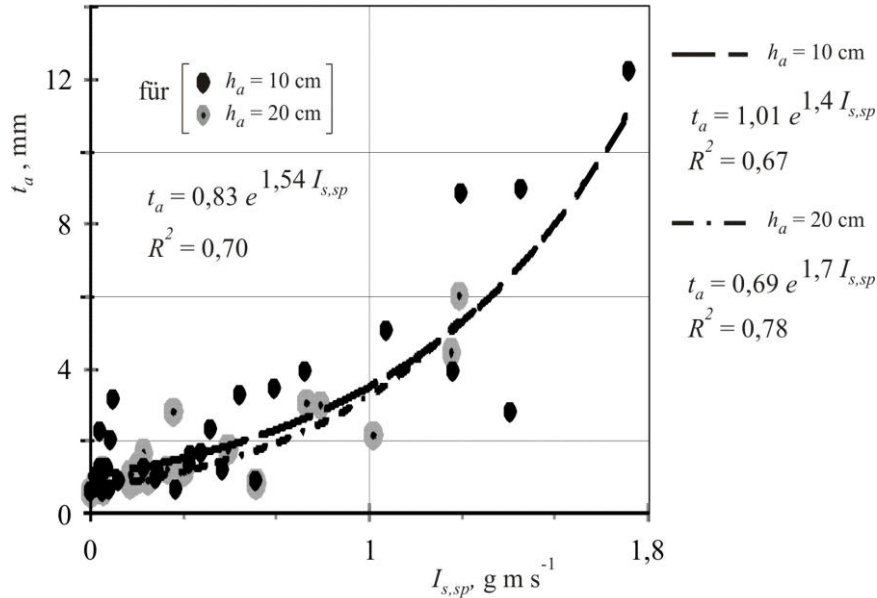


Bild 5.20 Zusammenhänge zwischen t_a über $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen in Abhängigkeit der untersuchten Düsen- (d_d) und Betriebsparameter (p und h_a)

Vergleicht man die vorliegenden Regressionsergebnisse (vgl. **Anhang C, Bild C1** bzw. **C2** sowie **Bild 5.20**), so unterscheiden sich bezüglich der Korrelationskoeffizienten R die beiden linearen und exponentiellen Regressionsfunktionen nur wenig voneinander.

Beim Betrachten der Streudiagramme erkennt man einen stark positiven, linearen Zusammenhang beider Strahlparameter P_{max} (vgl. **Anhang C, Bild C1**) bzw. t_a (vgl. **Anhang C, Bild C2**) und $I_{s,sp}$ für den jeweiligen h_a ($R(I_{s,sp}, t_a) > 0,8$). Mit steigender $I_{s,sp}$ des wirksamen Tropfenstrahls ist erwartungsgemäß eine mittlere Erhöhung der Abtragstiefe t_a zu erkennen.

Mit vergrößertem $h_a = 20$ cm wird die Regressionsgerade der t_a -Funktion $t_a = f(I_{s,sp})$ bei gleichen $I_{s,sp}$ zu kleinen Abtragswerten hin verschoben.

Um die Regressionsgeraden differenziert nach Strahlteilflächen [K], [M], [R] zu analysieren und die in **Abschnitt 5.2** erläuterten funktionalen Zusammenhänge zwischen den Prozessparameter zusammenfassend zu beschreiben, wurden lineare Trendlinien entsprechend der teilflächenbezogenen Messwerte der t_a über der $I_{s,sp}$ gelegt und deren Korrelationskoeffizient R und Steigung ($5,8 \geq a \geq 0,7$) ermittelt (vgl. **Tabelle 5.6**).

Zu erkennen ist, dass bei beiden h_a die Korrelationen der t_a mit $I_{s,sp}$ in [K] und [M] wesentlich ausgeprägter ($R > 0,8$) ausfallen als in [R].

Bei $h_a = 10$ cm liegt die Steigung a der Regressionsgerade für [K] bei 5,8 und reduziert sich mit steigender radialer Entfernung r_s der Teilflächen vom [K] ($a = 2$ für [M] und $a = 0,8$ für [R]). Bei Anhebung des h_a auf 20 cm vergrößern sich der $R(I_{s,sp}, t_a)$ und die a für [M] leicht von 0,81 auf 0,87 bzw. von 2 auf 2,2. Außerdem sinkt dabei die Variationsbreite der Steigung a

der teilflächenbezogenen Regressionsgeraden von $5,8 \geq a \geq 0,8$ hin zu $3,7 \geq a \geq 0,7$.

Der linear abnehmende Wertverlauf mit Vergrößerung des Radius r_s von der Strahlachse ist, wie in den vorangegangenen Abschnitten mehrfach dargelegt, auf die Verringerung des Aufprallwinkels $\theta_{s,h=f(z)}$, was zum Absinken der durch Stoß- bzw. Staudruck gekennzeichnete Schlagbeanspruchung am Abtragsmaterial führt, und die Abnahme der Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen zurückzuführen.

Wie in **Abschnitt 3.2.3** erläutert, ist hier auch zu erwähnen, dass mit steigender Abtragstiefe t_a auch die Reibungs- und Dämpfungsverluste in der Abtragsspur zunehmen. Dies verursacht zugleich eine Verschlechterung der durch das erodierend wirkende, seitlich zusammenhängend strömende Fluid bewirkten Schubbeanspruchung insbesondere in [M] und [R]. Dies führt zu einer Verwischung der darzustellenden Ergebnisse. Daher sind die Abtragstiefenvergleiche bzw. Gegenüberstellungen von Strahleffizienten grundsätzlich subtil zu behandeln, da ungleiche Abtragstiefen unterschiedliche Reibungs- und Dämpfungsanteile im Abtragsmaterial bewirken. Dies bedeutet, dass bei optimaler t_a und folglich geringem Dämpfungsverlust ein höherer Strahlbelastungsanteil zur Materialabtragung sowie zur Schubwirkung auf das abgetrennte Material während seines radialen Abfließens beiträgt.

Bei Betrachtung des erfassten Datensatzes (vgl. **Anhang C**) bzw. des Streudiagramms (vgl. **Bild 5.20**) sind die Abtragstiefenverläufe im Trend exponentiell ansteigend (exponentielle Trendregression) zu erkennen.

Dabei kann die hier mit dem d_d theoretisch quadratisch ansteigende Strahlleistung $e_{s,h=0}$ (vgl. **Gleichung 3.5**) offensichtlich nicht in gleicher Form in eine Erhöhung der t_a umgesetzt werden. Als Grund können auch in diesem Fall die strahlinternen bzw. analog zur t_a progressiv ansteigenden Reibungs- und Dämpfungsanteile, insbesondere bei zusammenhängenden und kompakten Strahlen, genannt werden.

In der Regressionsanalyse entsprechend **Anhang B, Bild B1** und **Anhang C, Bild C1** zeigt der lineare Zusammenhang zwischen den Messdaten $I_{s,sp}$ und $C_{s,sp}$ der abtragwirksamen Strahlsegmente bzw. Tropfen (vgl. **Gleichung 3.1**), dass die Trendlinie mit der ansteigenden Strahlleistung $e_{s,h=0}$ in Abhängigkeit der Parameter d_d bzw. Q , p und h_a ($a = 0,02$; $R = 0,96$ für $h_a = 10$ cm und $R = 0,98$ für $h_a = 20$ cm) proportional ansteigt.

Im Zusammenhang der Materialeigenschaften (vgl. **Bild 3.5**) tritt bei bestimmten Düsen- (d_d , Q und $\theta_{s,h=0}$) und Betriebsparameter (insbesondere p , h_a und t_b) ein Abtragsoptimum auf, welches sowohl einer gewissen Strahlbelastungsart (vgl. **Abschnitt 3.2.4**) bzw. Strahldynamik zuzuordnen ist als auch der Strahldivergenz.

Prinzipiell ist es relevant, wie die Strahlleistung $e_{s,h=0}$ auf die abzutragende Materialfläche gebracht wird. Der in vorangegangenen Abschnitten dargestellte Vergleich zwischen den Inputparametern *Spritzdruck* p und *Düsendurchmesser* d_d zeigt Unterschiede bei dem auf die Leistungssteigerung bezogenen Abtragstiefenanstieg in den verschiedenen Strahlteilflächen. Für den effizienten Abtragstrahleinsatz mit einem hohen teilflächenbezogenen Flächenratio ξ_{ae} ist es energetisch wesentlich sinnvoller, eine Leistungserhöhung durch die Vergrößerung der Q unter Konstanthaltung des p anzuregen. Eine Leistungssteigerung durch Spritzdruckan-

stieg wird entsprechend der gewählten Prozessparameter durch den zum [R] hin anwachsende Strahlzerfall und damit gleichzeitig durch Wirkungseinbuße kompensiert.

5.2.2. Abschätzung des Schädigungspotentials der Wasserstrahlen bei Gemüsewäsche

Für eine anwendungstechnische Bewertung von Reinigungsstrahlen mit Hilfe der in vorangegangenen Abschnitten dargestellten Messdaten, muss der Zusammenhang der auftretenden hydromechanischen Druckbelastungen und der Wirkung auf das Produkt bekannt sein. Zu diesem Zweck wurden für das Gemüse die gleichen Strahlvarianten angewendet, die auch zur Beanspruchung des standardisierten Testkörpers (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**) eingesetzt wurden.

Zur Ermittlung der Empfindlichkeitsgrenze von Spargel und Möhren gegenüber der Strahldruckbelastung wurde die physiologische Produktreaktion nach ihrer Beanspruchung durch die unter Verwendung verschiedener Niederdruckdüsen bei einem p von 3, 5 und 8 bar erzeugten Flüssigkeitsstrahlen untersucht (siehe **Abschnitt 4.2.3.3.1**).

Um den Einfluss der Strahldruckbelastung in einer t_b von 10 bis 15 s auf die Qualitätsveränderungen, die sowohl sichtbar als auch nicht sofort sichtbar sind, zu untersuchen und zu bewerten, erfolgten neben der Bonitur auch Messungen der Atmungsrate, Messungen zum Wasserhaushalt sowie zu den Veränderungen der Mikrotopographie der Produkte (siehe **Abschnitt 4.1.3.3**). Bei allen Messreihen wurden die Produkte unter definierten Bedingungen bei freier Konvektion bei 20°C und ca. 50 bis 80 % relativer Feuchte gelagert.

Die schädigende Materialbelastung bei Beanspruchung durch Wasserstrahlen beschränkt sich anhand der im **Abschnitt 5.1.1** dargestellten Abtragsergebnisse vorwiegend auf den Strahlkern [K], der durch die weitgehend senkrecht zum Aufprallmaterial weisende Strahlbelastungskomponente gekennzeichnet ist ($90^\circ \leq \theta_{s,h=f(z)} \leq 67^\circ$, vgl. **Bild 4.10**). Die Impulsintensität $I_{s,sp,K}$ steigt proportional zur Massenstromdichte $C_{s,sp,K}$ der wirksamen Tropfen an (vgl. **Anhang B, Bild B1 und Anhang C, Bild C1**), die sich mit zunehmender Strahlleistung $e_{s,h=0}$ durch den Volumenstrom- sowie Spritzdruckanstieg stärker erhöht, wodurch gegebenenfalls eine Schädigung entsprechend des Empfindlichkeitsgrades der unterschiedlichen Gemüse verursacht wird.

5.2.2.1. Bonitur

Ob eine Beanspruchung durch einen auf die Gemüseoberfläche aufprallenden Wasserstrahl zu sichtbaren Beschädigungen führt, ist, wie in **Abschnitt 3.2.3** erläutert, von der spezifischen Strahldruckbelastung bzw. der $I_{s,sp}$ der wirksamen Wassertropfen als Folge der Düsen- und Betriebsparameter (insbesondere Düsendurchmesser d_d , Spritzdruck p und Vorschubgeschwindigkeit) abhängig (siehe **Abschnitt 3.4** und **Abschnitt 3.5**).

Mit der Erhöhung der Eingangsgrößen d_d und p bei gleichem h_a treffen mehr Wasserstrahl pro Zeit- und Flächeneinheit auf das Reinigungsgut, was zu einer Steigerung der absolut auf dessen Oberfläche aufgebrachten Strahlenergie führt. Folglich nimmt der Anteil der beschädigten Gemüse zu, aufgegliedert nach vereinzelt, wenigen bzw. vielen flächenhaften Beschädigungen (**Strahlwirkungsklasse 3**, vgl. **Abschnitt 4.3.2**).

Entsprechend der Reinigungsergebnisse ist ersichtlich, dass mit der Verschiebung der Wirk-

mechanismen hin zu zusammenhängenden und kompakten Wasserstrahlanteilen (siehe **Abschnitt 3.2.3** und **Abschnitt 3.2.4**) der Anstieg der Beschädigung flächenhaft vom Strahlkern [K] hin zur Strahlmitte [M] anwächst.

a. Kopfsalat

Mit E2 ($d_d = 1,1$ mm) bei einem $p = 5$ bar sind unter Laborbedingungen deutliche, qualitätsmindernde Schädigungen auf der Blattoberfläche mit einer dynamischen Belastung durch den bei $h_a = 10$ cm gebildeten [K] zu verzeichnen. Bei $p = 3$ bar verursacht die Beanspruchung durch den Wasserstrahl nur vereinzelte kleine Druckstellen (**Strahlwirkungsklasse 3**: $\leq 5\%$). Durch die Anhebung des h_a auf 20 cm verschiebt sich bei einem p von 3 bar der Grenzwert des d_d für produktschonende Salatreinigung zu dem größeren Wert von 1,3 mm (E3). Beim Einsatz von E3 bei einem $p = 3$ bar wurde ein Anteil von leicht beschädigten Kopfsalaten (**Bild 5.21 a**) mit wenigen flächenhaften Druckstellen (**Strahlwirkungsklasse 3**) an der beanspruchten Blattoberfläche von 7% ermittelt. Damit repräsentiert diese Strahlvariante E3_23 im [K] den maximal zulässigen Grenzwert der $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen.

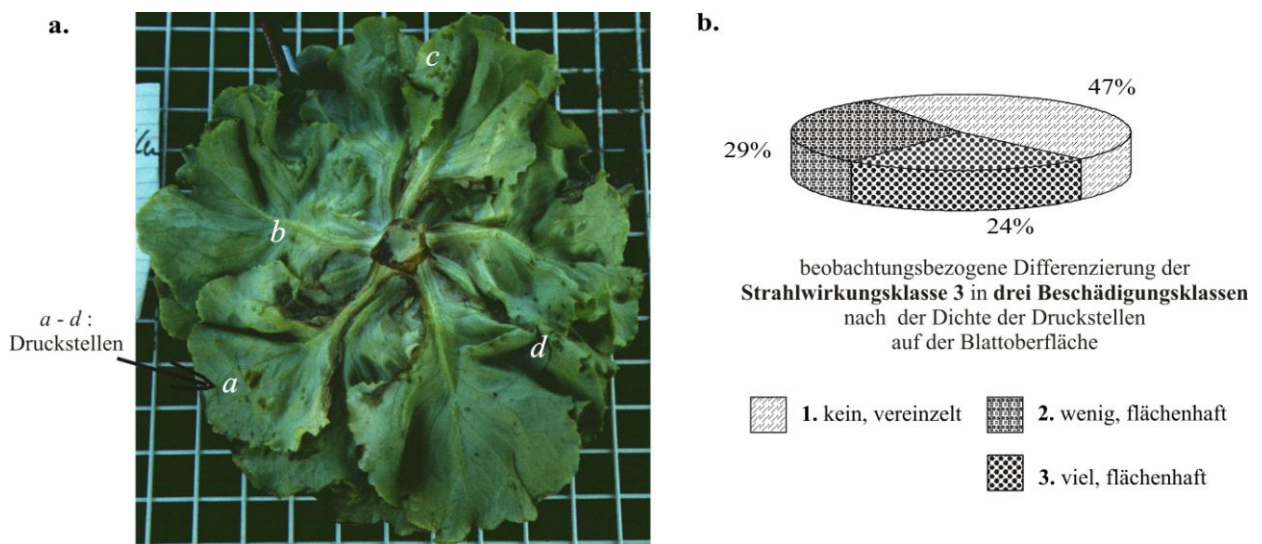


Bild 5.21 (a) Beispiel eines Kopfsalates mit Druckstellen nach Aufprall eines Strahls E4_23 und (b) relativer Anteil der Beschädigungen, eingeteilt in Strahlwirkungsklassen

Bild 5.22 stellt die Versuchsergebnisse zum Beschädigungspotential auf Kopfsalate (**Strahlwirkungsklasse 3**) dar mit Angabe entsprechender Kennwerte von Strahlen, deren Abtragspotential (t_a) mit den Ergebnissen auf den standardisierten Testkörpern in Beziehung gesetzt ist.

Bei den Versuchsreihen in Praxisanlagen (vgl. **Bild 4.3**; Gemüsebaubetrieb, Griesheim) variierte der Arbeitsabstand h_a von 15 bis 25 cm für die oberhalb bzw. 15 bis 17 cm für die unterhalb des Förderbandes angeordneten Düsen im Waschtunnel. Beim Bonitieren der Beschädigungen nach Belastung durch den mit E3 bei $p = 2,5$ bar gebildeten Strahl in einer Verweilzeit t_v von ca. 10 s ließ sich ein Anteil von Kopfsalaten mit wenigen flächenhaften Druckstellen von 11% bestimmen. Bei der Anwendung von E4 hatten dagegen die Kopfsalate deutliche flächenhafte Druckstellen (**Strahlwirkungsklasse 3**, **Bild 5.21 b**).

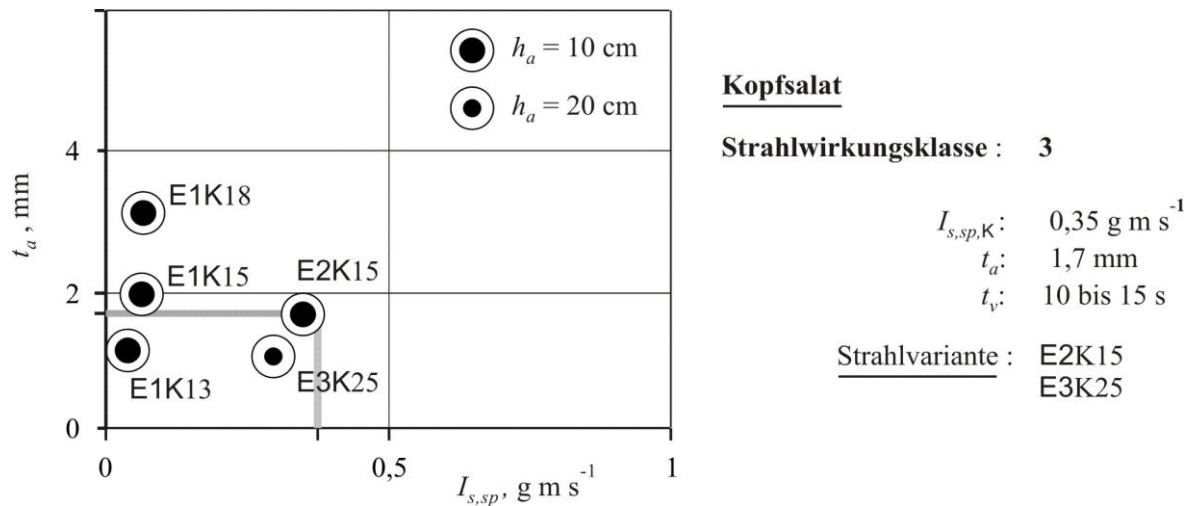


Bild 5.22 Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Kopfsalat mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparametern bezogen auf $I_{s,sp}$, t_a und t_v

Die zunehmende Zahl an Druckstellen bei Vergrößerung des d_d ist auf eine deutlich stärker ausgeprägte Strahlstabilität und eine Zunahme des zusammenhängenden Strahlanteils mit einhergehender Steigerung der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen zurückzuführen. Zusätzlich kommt es durch den geringen h_a ($< 20 \text{ cm}$) zum Anstieg der spezifischen Strahlenergie $e_{s,h=0}$, wodurch eine erhöhte qualitätsmindernde Veränderung der Gemüseoberfläche hervorgerufen wird.

b. Bleichspargel

Entsprechend der Untersuchungen bei Kopfsalat wurden auch Bleichspargel im Labor untersucht. Unter Laborbedingungen werden bei den Bleichspargeln während der Beanspruchung durch den mit E3 bei $p = 5 \text{ bar}$ und $h_a = 10 \text{ cm}$ erzeugten Strahl (E3_15) in einer Belastungsdauer t_b von 10 bis 15 s flächenhafte qualitätsmindernde Gewebeschäden sichtbar (**Bild 5.23**). Die Schäden äußern sich in einer Zerstörung der äußersten Gewebeschicht.

Druckbelastung durch
die Strahlvarianten:



Bild 5.23 Sichtbare Beschädigungen des Oberflächengewebes bei Bleichspargeln durch Druckbelastung verschiedener Strahlvarianten

Bei einzelnen Stangen konnten bereits unter 3 bar p sichtbare Gewebeschäden festgestellt werden (**Bild 5.23**), so dass mit E3 der Druck $p = 3$ bar den maximal zulässigen Grenzwert der Strahlleistung für den $h_a = 10$ cm darstellt, insbesondere im [K]. Einhergehend mit der Anhebung des h_a auf 20 cm kommt es zur Reduktion der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen. So trat eine leichte Gewebeschädigung an Spargel durch einen Strahl bei $p = 3$ bar erst bei einer höheren $Q = 7,2 \text{ l min}^{-1}$ (E4, $d_d = 1,7$ mm) auf (**Bild 5.24**).

Jedoch bei Verwendung der selben Düsen E3 und E4 und Strahlvarianten an der Praxisanlage (vgl. **Bild 4.1**) zeigt sich, dass bei h_a von 13, 16 und 20 cm geringere Beschädigungen als im Labor auftraten. Dies hängt damit zusammen, dass es in der Praxisanlage mit 20 Düsen zu negativen Strahlinteraktionen, das heißt, Absenkung der Strahlenergie kommt.

Vergleicht man die Boniturmessungen an den in der Praxisanlage gereinigten Spargeln bei unterschiedlichen Betriebsparametern miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar: Während unter Anwendung beider Düsen E3 und E4 bei $p = 3$ bar und h_a von 16 und 20 cm kaum Einwirkung der Strahlbelastungen auf die äußere Produktqualität von Bleichspargel festgestellt wurde, war insbesondere mit E4 bei h_a von 13 cm ein geringer Anteil an leicht beschädigten Spargeln von $< 5 \%$ erkennbar.

Die Produktbeschädigungen nahmen jedoch zu bei einer Verringerung der Düsenanzahl von 16 auf 8 oberhalb sowie von 12 auf 6 unterhalb des Förderbandes bzw. einer Vergrößerung des Abstandes zwischen den Düsenreihen (bis zu 12 %).

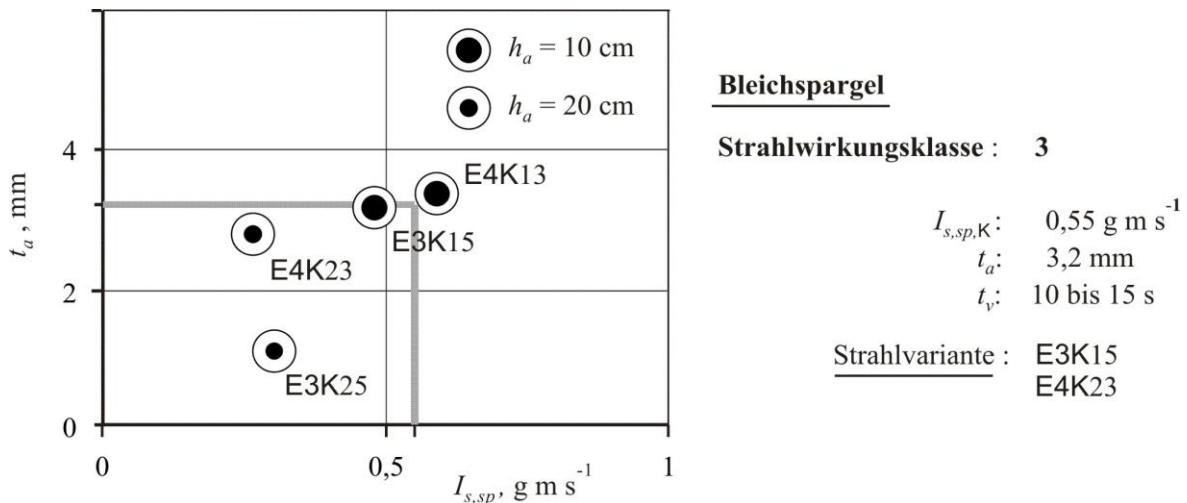


Bild 5.24 Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Bleichspargel mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparameter bezogenen auf $I_{s,sp}$, t_a und t_v

Der verringerte Beschädigungsanteil von Spargelstangen in der Praxisanlage lässt zum einen auf die Verringerung der axialen Stoßdruckbeanspruchung bedingt durch die aus der Düsenanordnung (ca. 10° Neigung) resultierenden, tangential zur Oberfläche aufprallenden Strahlen (kleinere Strahlaufreffwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$) schließen (siehe **Abschnitt 3.2.3** und **Tabelle 3.1**). Zum anderen ist dies augenscheinlich auf vermehrte Wasserstrahlkonzentration, sowie erhöhte Reibungs- und Dämpfungsverluste der Strahlenergie durch die vor dem Aufprall zu

beobachtende Interaktion der Strahlen aus den benachbarten Düsenreihen zurückzuführen.

Aufgrund der gemüseartbezogenen Unterschiede der Beschädigungsempfindlichkeit bei aus dem Strahlaufprall resultierender Belastung ist festzustellen, dass bei Spargel eine höhere Widerstandsfähigkeit vorliegt als bei Kopfsalat. Das heißt, $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen (vgl. **Bild 5.22** und **Bild 5.24**) als produktschonender Grenzwert ($I_{s,sp,K} = 0,35 \text{ g m s}^{-1}$) ist für Kopfsalat kleiner als für Bleichspargel ($I_{s,sp,K} = 0,55 \text{ g m s}^{-1}$).

Dies bedeutet, dass die Wechselwirkung der relevanten Prozessparameter untereinander und ihre Einflüsse auf die Einstellung der spezifischen Strahlbelastungshöhe bezüglich ihrer Beschädigung oder Reinigung von Gemüse entscheidend bzw. relevant sind. Aus diesen Reinigungsversuchen wird anschließend eine optimal erscheinende Kombination von einzusetzenden Düsen- und Betriebsparametern (insbesondere d_d , p , Q und t_v) festgelegt. Im Hinblick auf einen optimalen Effektivitäts- und Effizienzgrad schafft dies die Voraussetzung für die Anpassung der Strahleigenschaften an den angestrebten Reinigungsgrad und die Eigenschaften des Schmutzes und des zu reinigenden Gemüses.

5.2.2.2. Gaswechsel

Um erweiterte Erkenntnisse über den Grad der Beschädigung bzw. die Beschädigungsgrenze von Spargel und Möhren zu erhalten, wurden Messungen der Masseverluste, der Atmung und der Transpiration von durch Wasserstrahlen beanspruchte Gemüse durchgeführt.

Neben der Bewertung sichtbarer Produktschäden dienen diese Beobachtungen zur Erfassung der äußerlich nicht oder kaum erkennbaren Beschädigungen im Strahlreinigungsprozess.

Ob die Strahldruckbelastung auf die Spargeloberfläche zu Gewebebeschädigungen und somit zur Verkürzung der Haltbarkeit führt, liegen Erhebungen bezüglich der prozentualen Masseverluste, der Atmungsaktivität, der Transpiration der belasteten Produkte im Lagerversuch bei ca. 20 bis 25°C und 40 bis 70% relativer Feuchte sowie der Dunkelfärbung des äußeren Abschlussgewebes von Möhren vor. Folgend sollen die physiologischen Eigenschaften einer vergleichenden Bewertung unterzogen werden im Hinblick auf die Interpretierbarkeit und Aussagefähigkeit der Ergebnisse.

a. Bleichspargel

Masseverlust

Tabelle 5.7 stellt die prozentualen Masseverluste der durch Strahlen beanspruchten Spargel und der unbelasteten Spargel als Kontrolle in einer Übersicht zusammen.

Zur Bestimmung des Masseverlustes wurde im Versuchsjahr 2003 über mehrere Messreihen die Masse der durch Strahlen beanspruchten ca. 150 Spargelstangen vor der Beanspruchung, sowie danach über eine Versuchsdauer bis ca. 4 Tage gemessen.

Zusätzlich wurden in 2005 ca. 120 Spargel nach ihrer Beanspruchung durch Strahlvariante E3_13 untersucht.

In einer Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Messreihen (siehe **Tabelle 5.7**) führte die Belastung der Spargel durch die Strahlvariante E3_13 bei **Messreihe 2** im Mittel zum 1,2fach gesteigerten nicht signifikanten Masseverlust nach einer 2-tägigen Lagerung

($\bar{x} = 26,2 \%$) gegenüber dem Kontrollwert ($\bar{x} = 22 \%$).

Tabelle 5.7 *Mittlere Masseverluste von unbelasteten und durch verschiedene Strahlvarianten belastete Bleichspargel nach Lagerung bei ca. 25°C und 50 bis 60% relativer Feuchte sowie Angabe zu den Spektren der erfassten Massenverluste und deren $\pm SD$ der Mittelwerte*

Mittelwert des prozentualen Masseverlustes durch verschiedene Strahlvarianten belasteter Spargel				
	Kontrolle	E3_13	E3_15	E4_13
Versuchsjahr 2003				
<u>Messreihe 1</u>				
$t_L = 2$ Stunde	2,8 % [2,1 - 3,9 %; SD = $\pm 1,0$]	—	3,4 % [2,4 - 4,1 %; SD = $\pm 0,7$]	3,5 % [2,6 - 6,1 %; SD = $\pm 1,1$]
$t_L = 23$ Stunde	7,6 % [7,3 - 7,9 %; SD = $\pm 0,3$]	—	9,4 % [7,4 - 16,5 %; SD = $\pm 1,3$]	8,1 % [2,4 - 13,6 %; SD = $\pm 2,8$]
<u>Messreihe 2</u>				
$t_L = 2$ Tage	22,1 % [19,6 - 31,2 %; SD = $\pm 8,0$]	26,2 % [15,9 - 31,2 %; SD = $\pm 1,9$]	25,3 % [2,4 - 13,6 %; SD = $\pm 3,8$]	—
<u>Messreihe 3</u>				
$t_L = 4$ Tage	—	24,8 % [9,5 - 40,9 %; SD = $\pm 10,0$]	—	—
Versuchsjahr 2005				
<u>Messreihe 1</u>				
$t_L = 29,3$ Stunde	9,7 % [7,9 - 11,6 %; SD = $\pm 2,6$]	8,9 % [5,6 - 13,3 %; SD = $\pm 2,6$]	—	—

Bezogen auf Masse reagieren die Bleichspargel, im hier dargestellten Fall, nur wenig bzw. nicht signifikant auf die Druckbelastung durch die Strahlvariante E3_13. Eine Erhöhung der Strahlleistung $e_{s,h=0}$ durch Anhebung des p von 3 auf 5 bar sowie Einsatz der E4 statt E3 bewirken trotz einhergehender Vergrößerung der Q keine weitere Veränderung.

Dieses Verhalten kann darauf zurückgeführt werden, dass es mit zunehmender Strahldichte zu einer Zunahme des zusammenhängenden Strahlanteils kommt mit einhergehender Reaktion der Stoßdruckbelastung, was zu einer Verringerung der aufprallenden Freistrahllleistung durch Reibungs- und Dämpfungseinflüsse führt (vgl. **Abschnitt 3.2.3 und 3.2.4**).

In beiden Versuchsjahren lagen innerhalb jeder Einzelmessreihe große Wertstreuungen des auf die Ausgangsmasse bezogenen Masseverlusts der Spargel und somit hohe Standardabweichungen ($\pm SD$) der Mittelwerte vor.

Inwiefern die auftretenden Erhöhungen bzw. Unterschiede im Verlauf der Masseverluste auch auf die am Düsenausgang zur Verfügung gestellten Strahlleistung $e_{s,h=0}$ zurückzuführen sind, konnte im Rahmen der durchgeführten Massmessungen nicht deutlich analysiert werden. Die erzielten Ergebnisse lassen somit keine Aussagen zu direkten Zusammenhängen zwischen Beschädigungspotential und Strahlleistung $e_{s,h=0}$ mit Niederdruckdüsen zu.

Atmung

Bei belasteten frischen Spargelstangen ist die Varianz der Messwerte der Atmungsrate entsprechend des Reifestadiums unterschiedlich. Die Unterschiede der mittleren Atmungsraten

der durch die Strahlvariante E3_13 beanspruchten Spargel und deren Ausgangswerte liegen nach einer 96-minütigen Lagerung tendenziell leicht über dem Kontrollwert (**Bild 5.25**).

Der Anstieg der mittleren Atmungsrate nach einer Strahlbelastung lag zwischen 2,5 bis 4 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ und somit bis etwa 2,1fach höher als bei dem Kontrollwert (1,9 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹).

Transpiration

Die ebenso hydromechanisch belasteten Spargel weisen im Versuchsjahr 2005 bei allen Messreihen nach einer 29,3-stündigen Lagerung leicht höhere mittlere flächenbezogene Transpirationsraten E als die Kontrollwerte auf. Sie wiesen gegenüber dem Kontrollwert eine um 1,33-, 1,24- bzw. 1,22fach erhöhte E auf (**Bild 5.25**).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die durch Erhöhung des d_d und/oder p hervorgerufene Steigerung der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen neben den auftretenden sichtbaren Gewebeschäden auch begrenzt erhöhte Wasserverluste und folglich schnellere Qualitätsminderung der zu reinigenden Spargel nach der Lagerung verursachen kann.

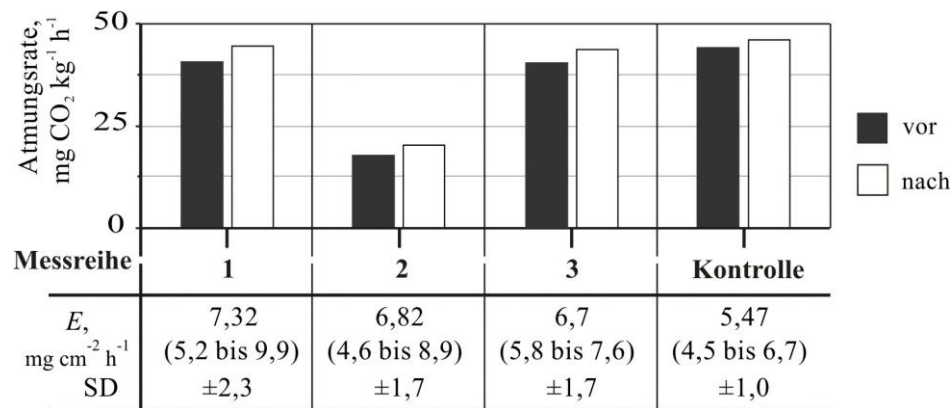


Bild 5.25 Atmungs- und Transpirationsraten E der Spargel vor und nach Belastung durch Strahlvariante E3_13 nach 96-minütiger bzw. 29,3-stündiger Lagerung bei ca. 25°C und 50 bis 60% relativer Feuchte sowie Angabe zu den Spektren der erfassten Transpirationsraten und deren $\pm SD$ der Mittelwerte

Somit kann, wie im **Abschnitt 5.2.2.1** erläutert, die der Strahlvarianten E3_15 und E4_23 zuzuordnende spezifische Impulsintensität $I_{s,sp}$ im [K] mit den in **Bild 5.24** angegebenen Kenngrößen und deren Abtragpotential in Form von t_a auf Testkörper als Belastungsgrenze von Spargel (**Strahlwirkungsklasse 3**) festgelegt werden.

b. Möhre

Transpiration

Um weitere Erkenntnisse über die physiologische Reaktion der Möhren mit gesteigerter Widerstandsfähigkeit auf die Druckbelastung durch verschiedene Strahlvarianten zu erhalten, wurden Messungen zum Wasserhaushalt und zur mechanischen Gewebeeigenschaft handgeernteter belasteter Möhren durchgeführt.

In **Bild 5.26 a** wurden für verschiedene Strahlvarianten bei p von 3, 5 und 8 bar, mit d_d von 1,1 mm (E2), 1,3 mm (E3), 1,7 mm (E4) und 2,1 mm (E5) die unterschiedlichen Mittelwerte des Gewebewiderstandes r_T und der flächenbezogenen Transpirationsrate E der belasteten

Möhren exemplarisch gegenübergestellt.

Wie **Bild 5.26 b** und **Bild 5.27** dargestellt, beschränken sich die weiteren Messreihen für die Abschätzung der Beschädigungsgrenze von Möhren unter Variation der Lagerdauer t_L nach Druckbelastungen auf die Strahlvarianten unter Einsatz von E3 und E4 bei $p \geq 5$ bar.

Zusätzlich sind in Tabellen die im Rahmen der Versuche erfassten Messwertspektren und die Standardabweichungen ($\pm SD$) der Mittelwerte angegeben.

Vergleicht man die Mittelwerte bei einer Steigerung der am Düsenausgang bereitgestellten hydraulischen Strahlleistung $e_{s,h=0}$ miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

Unabhängig von der relativ großen Variabilität in der Stressreaktion haben die Beanspruchung durch die Wasserstrahlen während kurzzeitiger Lagerung der belasteten Möhren direkte Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

Es zeigen sich leicht höhere Mittelwerte der Transpirationsrate E gegenüber der Kontrolle (bzw. unbelasteten) (vgl. **Bild 5.26** und **Bild 5.27**).

Die mittleren r_T der belasteten Möhren nahmen bei Vergrößerung des Düsendurchmessers d_d von 1,1mm (E2) bis 2,1 mm (E5) unter konstanten Betriebsbedingungen nahezu linear ab und entsprechend steigen die mittleren Transpirationsraten E . Die Erhöhung des d_d von 1,1mm (E2) bis 2,1 mm (E5) und daraus theoretisch quadratisch ansteigender Strahlleistung $e_{s,h=0}$, verursacht bei $p = 5$ bar einen Anstieg der mittleren E der belasteten Möhren nach einstündiger Lagerung, wie **Bild 5.26 a** zeigt, um das bis zu 2,3fache für E4 und E5 gegenüber E2 und E3. Bei $p = 8$ bar liegt er jedoch 1,17- und 1,88mal höher für E4 bzw. E5 gegenüber E2. Mit Transpirationsrate E von $1,6 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ der belasteten Möhren sind bei $p = 3$ bar für E4 2,2fach höhere E im Mittel erzielt worden als bei $p = 8$ bar.

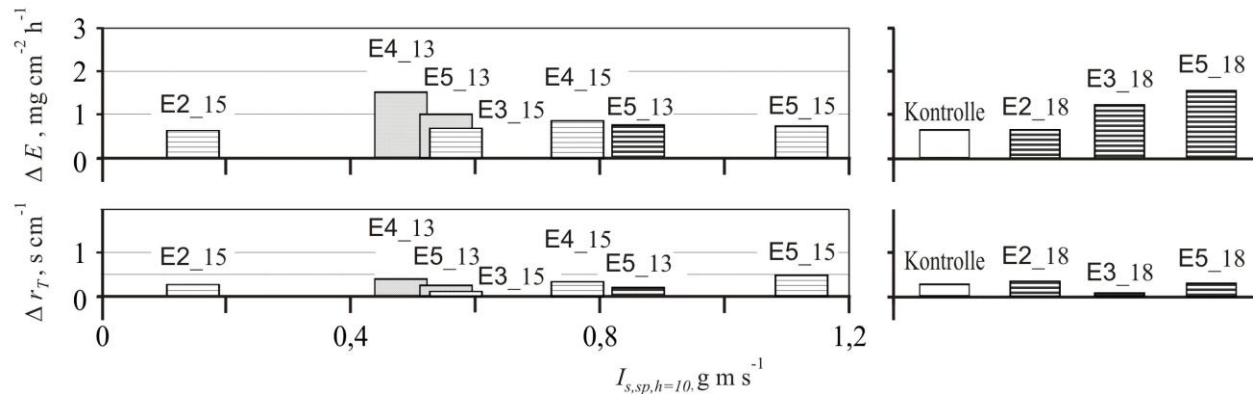
Unter gleichen Spritzbedingungen liegt bei E5 ein 0,2fach niedrigerer Mittelwert von E bei $p = 3$ bar als bei $p = 8$ bar vor. Festzustellen ist auch, wie auch bei den Abtragsversuchen (vgl. **Abschnitt 5.1.2**), dass bei Steigerung des p von 3 auf 5 bar die mittleren E der belasteten Möhren leicht fallende Werte annehmen. Sie weisen bei weiterer Druckerhöhung auf 8 bar Transpirationsraten E in ähnlicher Größenordnung auf, wie bei $p = 3$ bar.

Bei Verlängerung der Lagerdauer t_L der unbelasteten und belasteten Möhren bis 24 Stunden, wie in **Bild 5.27** dargestellt, ist zu erkennen, dass gegenüber der Kontrolle die auf die Ausgangsmasse bezogenen Masseverluste und somit die mittleren Transpirationsraten E zu Beginn der Lagerung (t_L bis 2 h) deutlich ansteigen und dann in der weiteren Lagerung nur geringfügig zunehmen.

Die hier registrierte Messwertstreuung und die hohen Standardabweichungen ($\pm SD$) der Mittelwerte sind augenscheinlich auch auf die Messungenauigkeit und -unsicherheit bei der Erfassung des auf dem Gemüse anhaftenden und eingedrungenen Strahlwassers sowie den unterschiedlichen Zustand der Möhren zurückzuführen. Darin ist auch die Ursache zu suchen, dass nach kurzzeitiger Lagerung bei circa 10 % aller untersuchten Möhren entgegengesetzte Trendverläufe der Messwerte registriert wurden, welche in die statistische Datenauswertung nicht einbezogen sind.

a. Spätgeerntete Lagermöhren:
November bis Dezember 2002

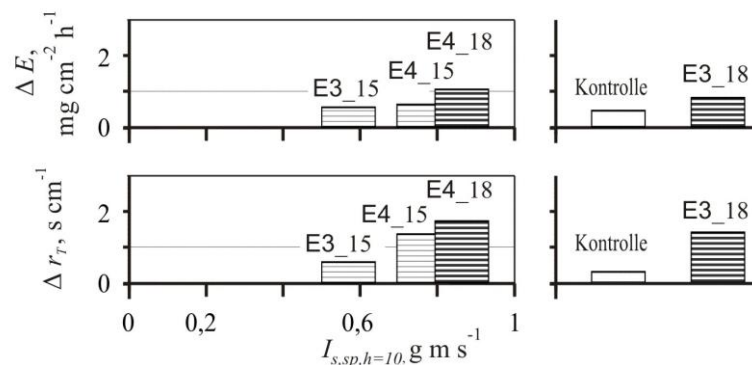
Lagerung:
bei 20 - 21 °C und 40 - 60% rel. Feuchte



	E2_15	E2_18	E3_15	E3_18	E4_13	E4_15	E4_18	E5_13	E5_15	E5_18	Kontrolle
Δr_T	0,09 bis 0,63	0,07 bis 1,51	0,14 bis 1,68	0,11 bis 1,62	0,18 bis 0,69	0,1 bis 0,66	0,1 bis 4,71	0,24 bis 0,56	0,13 bis 1,31	0,04 bis 1,76	0,13 bis 0,31
SD	0,52	0,44	0,61	0,21	0,27	0,15	0,47	0,06	0,15	0,61	0,22
ΔE	0,12 bis 1,29	0,18 bis 2,48	0,12 bis 3,07	0,19 bis 3,05	1,15 bis 1,96	0,39 bis 1,71	0,21 bis 4,5	1,01 bis 2,03	0,03 bis 1,62	0,5 bis 3,72	0,02 bis 2,19
SD	0,73	0,69	0,58	1,01	0,51	0,46	1,24	1,06	0,41	1,2	0,75

b. Frühgeerntete frische Möhren:
September 2003

Lagerung:
bei 20 °C und 50 - 60% rel. Feuchte



	E3_15	E3_18	E4_15	E4_18	Kontrolle
Δr_T	0,1 bis 1,42	0,16 bis 2,01	0,17 bis 1,38	0,59 bis 5,17	0,28 bis 0,29
SD	0,52	0,69	0,19	1,38	0,01
ΔE	0,12 bis 0,93	0,49 bis 1,67	0,13 bis 1,91	0,27 bis 1,83	0,32 bis 0,67
SD	0,34	0,32	0,27	0,17	0,25

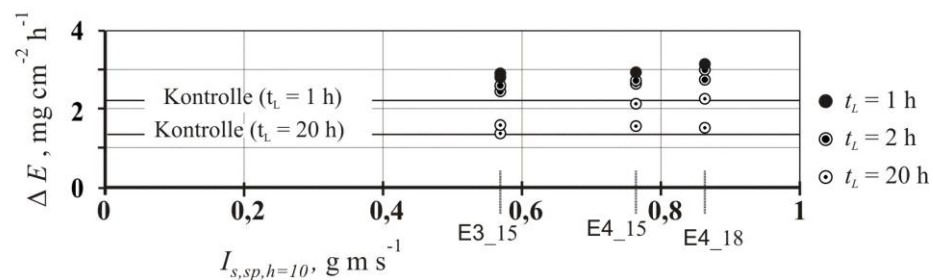
Bild 5.26 Mittlere Abnahme von r_T und Zunahme von E von unbelasteten und hydro-mechanisch belasteten Möhren zu unterschiedlichen Versuchszeiten (a) nach einstündiger Lagerung und (b) nach 24-stündiger Lagerung in Abhängigkeit von $I_{s,sp}$ bzw. Zusammenstellung der erzielten Messwertspektren und Angaben zu den $\pm SD$ der Mittelwerte

Eine Veränderung von p oder d_d zeigt unterschiedliche Ergebnisse in der Schädigung bzw. der Transpirationsrate E von Gemüse. Die unterschiedliche Reaktion der belasteten Möhren auf die mit dem Druck p überproportional und dem Düsendurchmesser d_d quadratisch ansteigende

Strahlleistung $e_{s,h=0}$ können anhand der im **Abschnitt 3.4** vorgestellten Theorien wie folgt erläutert werden:

Mit Vergrößerung des d_d und einhergehender Steigerung der Q verschiebt sich die Strahlzone von einem stoßartigen, schlagenden Belastungsanteil hin zu einer durch einen zusammenhängenden Strahl geprägten Staudruck- bzw. Erosionsbeanspruchung. Damit weisen die hydromechanisch belasteten Möhren ein nahezu klares Verhalten der mittleren E auf, was mit gesteigertem Wasserverlust zum schnelleren Verlust der Produktqualität sowie zur verkürzten Haltbarkeit führen kann (vgl. **Abschnitt 4.2.3.3**).

- c. Frühgeerntete frische Möhren: Lagerung:
August bis September 2003 bei 20 - 27 °C und 40 - 70% rel. Feuchte
September 2005 20 °C und 50 - 60% rel. Feuchte



	E3_15	E3_18	E4_15	E4_18	Kontrolle
$\Delta E (t_L \leq 2 \text{ h})$	1,4 bis 3,1	1,3 bis 3,7	1,8 bis 3,8	1,6 bis 3,9	2,1 bis 3,4
SD	0,35	0,49	0,47	0,61	0,34
$\Delta E (t_L = 24 \text{ h})$	0,9 bis 1,5	1,2 bis 2,1	0,8 bis 4,1	1,2 bis 3,2	1,2 bis 3,2
SD	0,19	0,29	0,81	0,51	0,31

Bild 5.27 Mittlere Zunahme von E von unbelasteten und hydromechanisch belasteten Möhren nach ein-, zwei- bzw. 24-stündiger Lagerung und Angabe zu den $\pm SD$ der Mittelwerte sowie Zusammenstellung des im Rahmen der Versuche erfassten Messwertspektrums

Die Druckerhöhung macht sich trotz einhergehender Vergrößerung des Q nicht signifikant bemerkbar, bedingt durch die sowohl durchmesser- und verkleinernden als auch durchmesser- und vergrößernden Effekte sowie durch die mit höherer $V_{s,sp}$ der Strahlen anwachsenden Reibungs- und Dämpfungsanteile. Neben dem beim Aufprallen eines zusammenhängenden Strahls auf der Gemüseoberfläche befindlichen Strahlwasserfilms, welcher die Aufprallwirkung dämpft (vgl. **Abschnitt 3.2.3**), ist das Verhalten auch auf die Heterogenität in Form von Gewebefestigkeit aufgrund des physiologischen Entwicklungszustands und der daraus resultierenden elastischen Nachgiebigkeit des Gemüses zurückzuführen.

Im Hinblick auf das Transpirationsverhalten des Reinigungsgutes Möhre ist es energetisch deutlich nachteilig, eine Strahlleistungserhöhung durch Vergrößerung des Q unter Konstanthaltung des p anzuregen. Diese Aussage deutet tendenziell auf die Empfindlichkeit von Möhren durch Staudruck und Erosion gekennzeichnete Strahlwirkung hin.

Aufbauend auf Literaturstudien und den hier erzielten Versuchsergebnissen führt die Produktbeanspruchung durch Wasserstrahlen jedoch tendenziell zum verringerten Gewebewider-

stand r_T sowie zur steigenden Transpirationsrate E . Tendenziell zeigt dies, dass die Gewebebeschädigungen am Frischgemüse durch Strahldruckbelastungen aufgrund der unzureichend an die Produkteigenschaften angepassten Waschdüsen und Betriebsbedingungen zu langanhaltenden Veränderungen des Wasserhaushalts führen und so die Produktqualität deutlich beeinträchtigen können. Eine mit zunehmender Impulsintensität $I_{s,sp}$ und Höhe von Strahldruckbelastungen ansteigende Transpirationsrate E äußerlich unbeschädigter Möhren ist daher auf eine Zunahme nicht sichtbarer Gewebebeschädigung zurückzuführen.

Wasserpotential

Für die Abschätzung des Schädigungspotentials während des Aufpralls der Strahlen auf die Gemüseoberflächen wurden Wasserpotentialmessungen an hydromechanisch belasteten und unbelasteten Möhren unter Variation der Lagerdauer t_L durchgeführt. Damit wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dem mittleren Wasserpotential und Empfindlichkeit von Möhren gegenüber Strahldruckbelastungen besteht.

Bild 5.28 zeigt die Veränderungen im Wasserpotential ψ_P unbelasteter sowie hydromechanisch belasteter Möhren unter Variation der Strahlvarianten zusätzlich zu den im Rahmen der Versuchsreihen registrierten Messwertspektren der Wasserpotentiale.

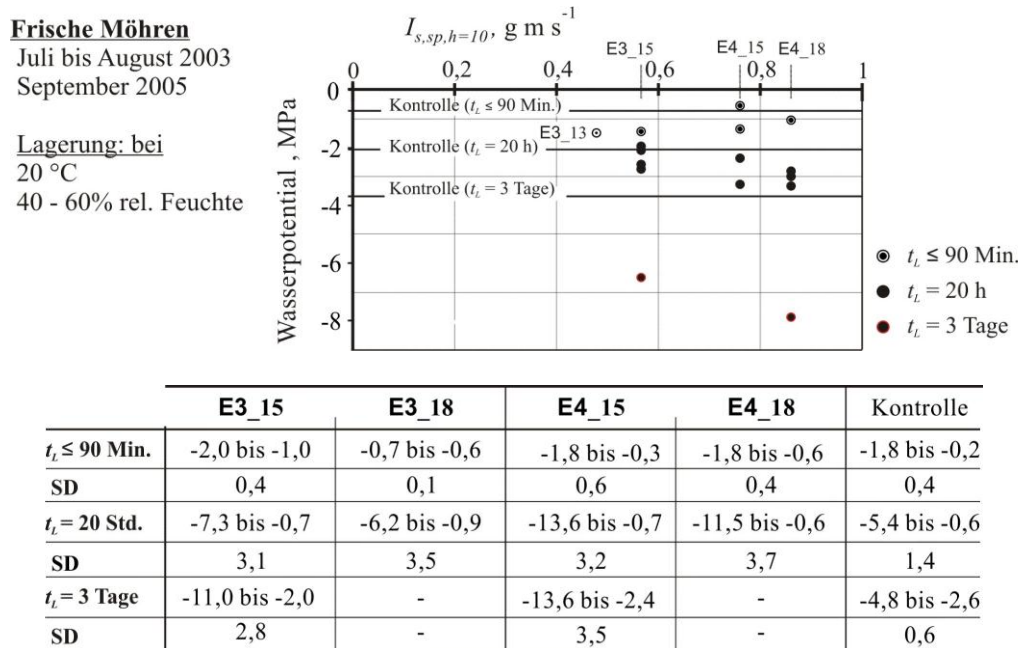


Bild 5.28 Wasserpotential unbelasteter und hydromechanisch belasteter Möhren nach Unterschiedlicher Lagerdauer (Lagerung bei 18°C bei einer Luftfeuchte von 45%) sowie Zusammenstellung des im Rahmen der Versuche erfassten Messwertspektrums

Bei kurzzeitiger Lagerung sind keine wesentlichen Unterschiede der mittleren Wasserpotentiale zwischen belasteten und unbelasteten Möhren erkennbar. In der Tendenz führte die durch Erhöhung des d_d hervorgerufene Strahlleistungssteigerung zu gesteigerten Mittelwerten des Wasserpotentials der belasteten Möhren. Die Mittelwerte der durch die Anwendung von E3 und E4 erzeugten Wasserstrahlen bei mit $h_a = 10 \text{ cm}$ belasteten Möhren lagen nach einer

$t_L \geq 20$ h hingegen deutlich höher als die der unbelasteten (Kontrolle).

Unter Variation des Spritzdruckes p bestanden dabei nur bei E3 und bei E4 mit $p \geq 5$ bar signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten in Abhängigkeit von verschiedenen Strahlvarianten.

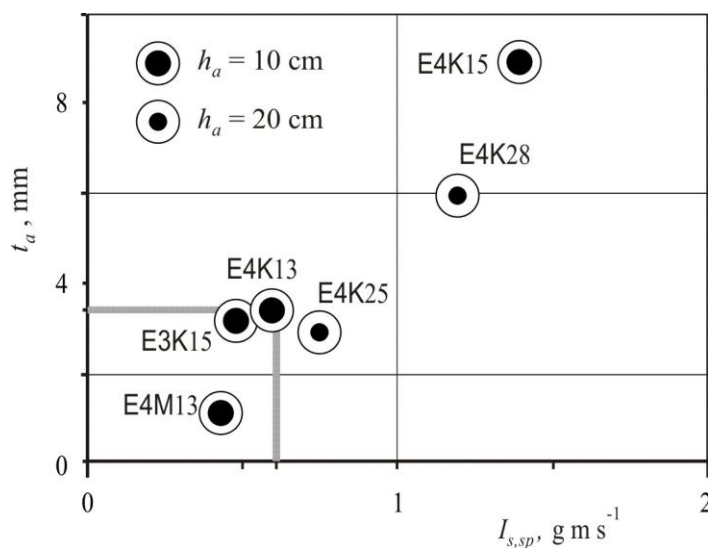
Die erfassten Trendverläufe der mittleren Wasserpotentiale in Abhängigkeit des p decken sich weitgehend mit den aus **Bild 5.26** gewonnenen nichtlinearen Verhalten der mittleren E . Die Messungen nach Strahlbelastung zeigen, dass tendenziell ein Einfluss der Strahldruckbelastung auf die Veränderung des Wasserpotentials und damit des Wasserzustands der Möhren hindeutet. Die Gewebeschäden durch Steigerung der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ führen auch zu langandauernden Veränderungen des Wasserhaushaltes und können die Produktqualität erheblich beeinträchtigen. Neben erhöhten Werten der mittleren Wasserpotentiale weisen die durch den mit E4 bei einem $p \geq 5$ bar gebildeten Wasserstrahl belasteten Möhren, insbesondere im Aufprallbereich des [K], nach 20-stündiger Lagerung auch eine deutliche Verfärbung des Abschlussgewebes auf (**Bild 5.29**).



Frische Möhre
nach Beanspruchung
durch die Strahlvariante
E4K15
und eintägiger Lagerdauer
($t_L = 1$ Tag)

Bild 5.29 Exemplarisches Foto einer durch E4K15 beanspruchten Möhre nach eintägiger Lagerdauer t_L mit Oberflächenverfärbung

Auch durch die mit E4 bei $p = 3$ bar sowie mit E3 bei $p = 5$ bar ausgebildeten Wasserstrahlen treten nach ca. 4 Tagen sichtbare leichte Gewebeschädigungen auf, und auch in geringem Ausmaß punktuelle Verfärbungen.



Möhre

Strahlwirkungsklasse : 3

$I_{s,sp,K}$: $0,61 \text{ g m s}^{-1}$

t_a : $3,4 \text{ mm}$

t_v : 10 bis 15 s

Strahlvariante : E4K25
E4K13

Bild 5.30 Schädigungsgrenzen der Strahlvarianten (■, Strahlwirkungsklasse 3) für Möhren mit verschiedenen Düsen- und Betriebsparameter bezogenen auf $I_{s,sp}$, t_a und t_v

Anhand der Versuchsergebnisse stellt der unter Anwendung von E4 ausgebildete Strahl bei $h_a = 10$ cm und $p = 3$ bar (E4_13) sowie bei $h_a = 20$ cm und $p = 5$ bar (E4_25) den kritischen Grenzwert der Impulsintensität $I_{s,sp}$, insbesondere im [K], dar (**Bild 5.30**).

Bei einer Anhebung des h_a auf 20 cm deuten die nahezu unveränderten Wasserpotentiale zwischen unbelasteten und hydromechanisch belasteten Möhren hingegen auf eine produkt-schonende Belastungsvariante der Strahlen aller untersuchten Versuchsreihen hin (ohne Bild).

Zusammenfassend handelt es sich bei frischen Möhren um ein relativ widerstandsfähiges Produkt im Vergleich zu Salat und Bleichspargel, wie auch an Hand der 1,7- bzw. 1,1fache Erhöhung der Impulsintensität $I_{s,sp,[K]}$ zur Beschädigungsgrenze (**Strahlwirkungsklasse 3**) festzustellen ist. Da jedoch Möhren ein sehr dünnes und empfindliches Oberflächengewebe besitzen, kann aber auch eine Strahlbelastung mit geringer $I_{s,sp}$, wie bei E3K15 ($I_{s,sp,[K]} = 0,58$ g m s⁻¹) und bei E4M13 ($I_{s,sp,[K]} = 0,43$ g m s⁻¹), schon geringe, zunächst nicht sichtbare Gewebebeschädigungen verursachen. Diesbezüglich wird das Abtragspotential (t_a) der Strahlen auf den standardisierten Testkörpern in Beziehung gesetzt und dabei entsprechende Düsen- und Betriebsparameter im Strahlbildungsprozess angegeben (vgl. **Bild 5.30**).

Mikrotopographie

Um im Bereich der ermittelten produktbezogenen Beschädigungsgrenze gegenüber hydromechanischen Druckbelastungen mögliche Gewebeschäden bzw. Qualitätsveränderungen auf den Produktoberflächen durch definierte Strahlvarianten zu charakterisieren, wurde ein mikrotopographisches Messverfahren eingesetzt (vgl. **Abschnitt 4.2.2.4**). Dabei beschränkt sich die vorliegende Analyse auf die Wasserstrahlen bei $h_a = 10$ cm und p von 3 und 5 bar, unter Anwendung von E3 und E4.

In **Bild 5.31** und **Anhang D** sind ausgewählte Messbilder der gemessenen Gemüseoberflächen zusätzlich zu den Messwerten mit den eingezeichneten Profilen dargestellt.

Aus den Höhenunterschieden in Oberflächenprofilen vor und nach der Beanspruchung desselben Produktes lassen sich unterschiedliche Aufprallwirkungen der Strahlen auf die Gemüseoberfläche unter variierender $I_{s,sp}$ durch veränderbare Prozessparameter d_d und p ableiten.

Dennoch sind in zahlreichen Messungen die Topographien der untersuchten Gemüseoberflächenausschnitte nicht vollständig erfasst worden, da aufgrund Unebenheiten auf der Produktoberfläche bestimmte Messpunkte unterhalb oder oberhalb der Messbereiche des verwendeten Messkopfes lagen. Eine weitere Einschränkung dabei ist neben schrägen Teilflächen das auf dem Gemüse verbleibende Reststrahlwasser, welches den von der zu vermessenden Gemüseoberfläche in den Messsensor zurück reflektierten Lichtstrahl stört und Fehlmessungen zur Folge hat. Auf den Darstellungen der Topographiedaten an untersuchten Spargeln und Möhren sind die fehlenden Werte, die von der Oberflächenanalysesoftware als Null interpretiert werden, als schwarze Bereiche zu sehen (siehe **Anhang D**).

Anhand der erstellten Messbilder ist daher eine Unterscheidung der Oberflächenveränderungen in Abhängigkeit von Strahlvarianten nur mit Einschränkungen möglich.

Deutliche Verformungen der beanspruchten Produktoberfläche können jedoch in den erfassten Messbildern erkannt werden. Wie im **Abschnitt 5.2.2.1** dargestellt, ist eine Verstärkung

von sichtbaren sowie nicht sichtbaren Gewebebeschädigungen auf den Gemüseoberflächen u. a. auf die mit erhöhter $I_{s,sp}$ ansteigende Druckbelastung zurückzuführen.

Mit Steigerung der Strahlleistung $e_{s,h=0}$, welche sich in punktuellen bis zu flächenhaften Gewebebeschädigungen widerspiegelt, sind ein Ansteigen flächenhafter Fehlmessungen auf den Messflächen beobachtet worden.

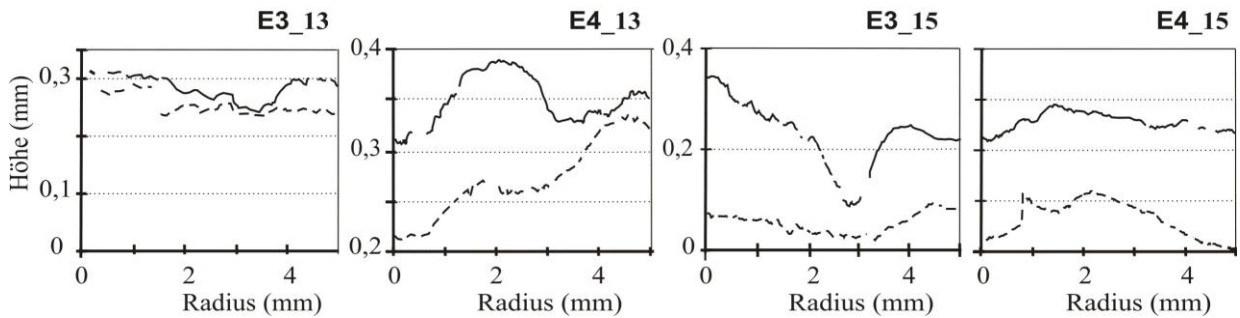


Bild 5.31 Ausgewählte Höhenprofildarstellung der Oberflächenausschnitte vor (—) und nach (----) der Spargelbeanspruchung durch die Strahlvarianten E3_13, E4_13, E3_15 und E4_15

In den Profilansichten und anhand des erzielten Messwertespektrums sind jedoch deutliche Höhenveränderungen in den gemessenen Oberflächenprofilen der Gemüse vor und nach der Beanspruchung zu erkennen. Die Höhenunterschiede aus den vor und nach der Spargelbeanspruchung durch die Strahlvarianten E3_13 und E3_15 erfassten Oberflächenprofile liegen zwischen 0,01 mm und 0,2 mm bzw. 0,1 mm und 0,4 mm (**Bild 5.31** und **Anhang D1** bis **D4**). Durch den Einsatz der Strahlvarianten E4_13 und E4_15 ist eine leichte Steigerung der Höhenunterschiede im Relief zu verzeichnen, zwischen 0,1 mm und 0,3 mm bzw. 0,1 mm und 0,5 mm. Auch bei Möhren führt die spezifische Beanspruchung durch Stoßdruckbelastungen der Strahlvarianten E4K15 und E4K18 zur leichten Höhenabnahme im Oberflächenrelief (**Anhang D5**). Die Spannweiten der Höhenunterschiede lagen bei E4_15 und E4_18 zwischen 0,1 und 0,2 mm bzw. zwischen 0,2 und 0,4 mm. Auf vielen Messflächen von Möhren nach der Strahlbelastung durch E4_18 sind jedoch aufgrund der möglichen Gewebebeschädigungen große flächenhafte Bereiche ohne Messwerte und somit schwarze Abbildungen auf den Messbildern zu erkennen.

5.2.3. Analyse der Reinigungseffektivität von Wasserstrahlen bei der Gemüesewäsche

Neben den produktspezifischen Empfindlichkeitsgrenzen unterschiedlicher Produkte ist auch das Reinigungspotential der Wasserstrahlen zu bewerten.

Zu diesem Zweck wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Widerstandsfähigkeit gegenüber der Strahldruckbelastung produktspezifische Strahlvarianten für Kopfsalat, Spargelstangen und Möhren angewendet, die auch zum Abtrag der standardisierten Testkörper (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**) eingesetzt wurden.

Um die reinigende Strahlwirkung auf die Gemüseoberfläche in einer Verweilzeit $t_v = 10$ bis 15 s zu bewerten, erfolgten Boniturmessungen. Entsprechend dem Boniturschlüssel wurden

aufgrund der großen Variabilität in der Reinigungs- und Abtragseffektivität der Strahlen 4 verschiedene **Strahlreinigungsklassen** gebildet (vgl. **Abschnitt 4.3**):

1. ungereinigt
2. teilweise gereinigt (deutliche Schmutzabtragung nur im Strahlkernbereich)
3. mäßig gereinigt und
4. sauber (marktfähiges Produkt, weitgehend ohne anhaftendes Erdmaterial)

Das Bonitieren des Reinigungsgrads der vom Erdmaterial zu reinigenden Gemüseoberfläche wurde unter Laborbedingungen (vgl. **Abschnitt 4.2**) sowie in Feldwaschanlagen von Gemüsebaubetrieben (vgl. **Abschnitt 4.3**) durchgeführt.

Aufgrund der Variation der Strahlstrukturdaten (siehe **Abschnitt 4.2.2.2**) wurde die Strahlbewertung teilflächenbezogen durchgeführt. Die Reinigungseffektivität der untersuchten Reinwasserstrahlen ist dabei durch die Empfindlichkeit der zu reinigenden Gemüseoberflächen begrenzt (siehe **Abschnitt 5.2.2**).

Anhand der im **Abschnitt 5.1.1** dargestellten Abtragsergebnisse ist ersichtlich, dass bei ansteigender Strahlleistung $e_{s,h=0}$ mit einhergehender Erhöhung der Massenstromdichte $C_{s,sp}$ und der daraus resultierenden Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen die effektive Abtragstiefe t_{ae} zunimmt (vgl. **Anhang B** und **Anhang C**).

Neben einer detaillierten Analyse der reinigenden Strahlenwirkung wurde auch eine Ableitung der daraus resultierenden reinigungstechnischen Optimierungspotentiale und konstruktiven Auslegung des Gemüsewaschverfahrens vorgenommen.

a. Kopfsalat

Bei Kopfsalat wurden in verschiedenen Waschanlagen Versuchsreihen unter Variation des h_a (10 bis 25 cm) und der Düsen (E1, E2, E3 und E4) mit d_d von 0,75 bis 1,7 mm für die Abschätzung des Reinigungspotentials der gebildeten Wasserstrahlen durchgeführt.

Dabei zeigen Messungen bezüglich des Reinigungsgrades und der Strahleffizienz bei Anwendung von E1 und E2, dass zur Erzielung der **Reinigungsklasse 3** (vgl. **Abschnitt 4.3**) die Kopfsalate den Waschbereich in Versuchswaschanlage (siehe **Bild 4.4**) im ATB mit der Strahlvariante E1_13 2- bis 3-mal ($28 \text{ s} \leq t_v \leq 42 \text{ s}$) durchlaufen muss. E2 mit ansteigender Strahlleistung $e_{s,h=0}$ reinigt gegenüber der E1_13 intensiver. Hierdurch können die Waschdurchgänge reduziert werden.

Im Hinblick auf eine effektive und Salat schonende Reinigung nähert sich E2 der **Reinigungsklasse 3** (**Bild 5.32 a**) bei Anhebung des h_a auf 15 cm sowie einer Verringerung der Düsenanzahl auf 12 oberhalb sowie auf 6 unterhalb des Förderbandes im Waschtunnel und somit einer Vergrößerung des Düsenabstandes. Zum einen ist mit E2 bei $p = 3 \text{ bar}$ und $h_a = 15 \text{ cm}$ der Strahlzerfall schon fortgeschritten und bildet das für die Salatreinigung optimale Tropfenspektrum sowie die für die Reinigung erforderliche $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen aus. Die Verringerung der Düsenanzahl verursacht eine geringere Wasserstrahldichte einhergehend mit abnehmender Strahleninteraktion und sinkenden Reibungs- und

Dämpfungsanteilen zwischen den Strahlen. Dies führt als Ergebnis zu einer Verbesserung der Reinigungseffektivität.

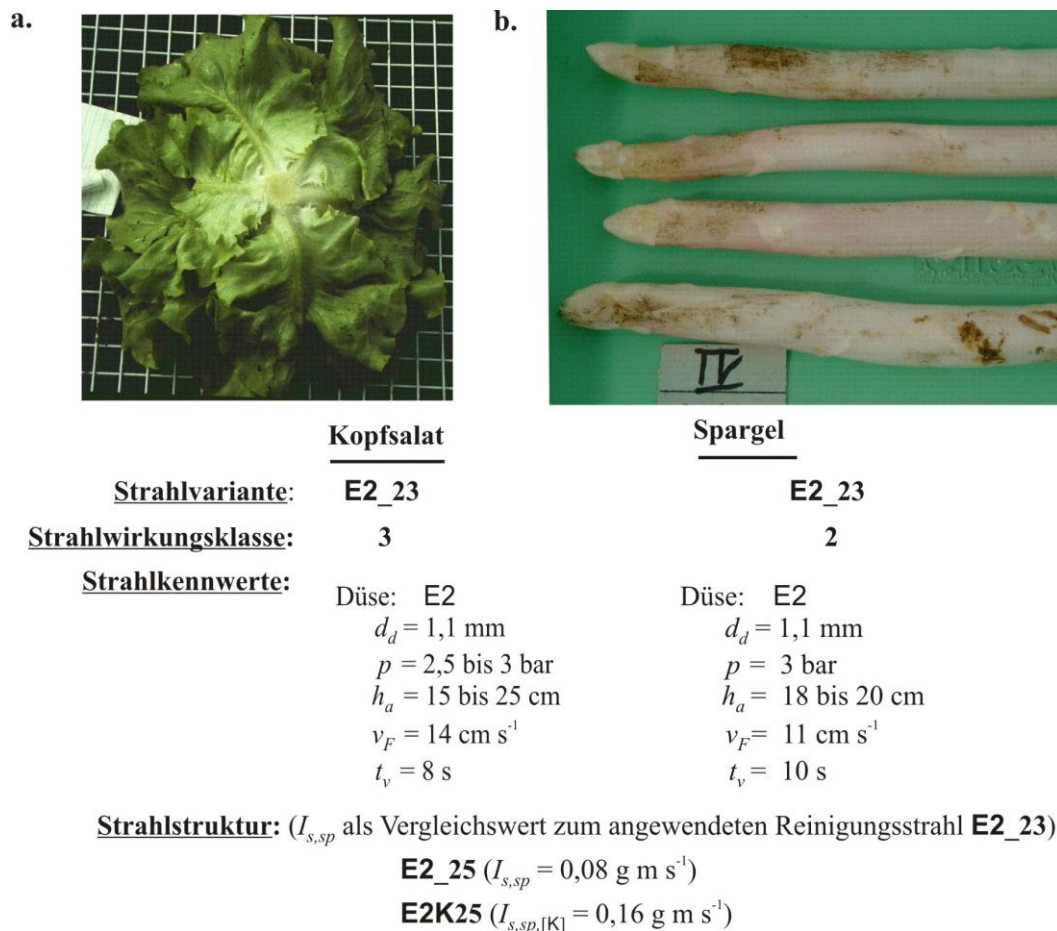


Bild 5.32 Exemplarische Fotos der Reinigungsergebnisse von durch ähnliche Wasserstrahlvariante beanspruchte Gemüse unterschiedlicher Reinigungsklassen, von (a) Kopfsalat und (b) Spargel, und Kennwerte der Düsen-, Betriebsparameter und Waschmaschinen und Strahlstrukturdaten aus Laboruntersuchungen

Die Reinigungsergebnisse von Strahlen mit E1 decken sich weitgehend mit den im **Abschnitt 5.1.2** und im **Abschnitt 5.2.1** erörterten Ergebnissen und Ansätzen zum Abtragspotential der Strahlen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass sich die Reinigungswirkung der Strahlen von E1 beim am Frischsalat leicht anhaftenden Erdmaterial hauptsächlich auf der Teilfläche "Strahlkern" [K] beschränkt. Die radial abströmenden Reinigungsstrahlen, welche sich aus der Anzahl der wirkenden Tropfenaufschläge pro Flächen- und Zeiteinheit ergeben, und daraus Schub- bzw. Erosionsbeanspruchung bewirken, wirken sich beim Abtragsprozess sowie zum Abtransport des abgetrennten Erdmaterials wesentlich geringer aus. Dabei verteilt sich die Strahlkraft beim E1 ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) auf einer großen Strahlfläche A_s und daraus resultieren geringe spezifische Impulsintensität $I_{s,sp}$ infolge spezifischer Normal- und Schubkräfte des aufprallenden Strahls.

Bei weiteren Messungen in Praxisbetrieben lässt sich beim Bonitieren des Reinigungsgrades nach Beanspruchung durch den mit E3 bei $p = 2,5 \text{ bar}$ gebildeten Strahl bei einer Verweilzeit

$t_v = 11$ s im Waschtunnel (siehe **Bild 4.3**) ein Anteil an mäßig bis sauber gereinigten Kopfsalaten (**Reinigungsklasse 3 bis 4**) von circa 90 % beobachten. Ein wesentliches Problem war jedoch, dass ca. 30 % der gereinigten Kopfsalate (**Strahlwirkungsklasse 3**) beschädigt wurden (**Beschädigungsklasse 2**).

Nach Austausch der Düsen auf E4 unter gleichen Spritzbedingungen zeigten sich bei allen Kopfsalaten deutliche Oberflächenbeschädigungen mit vielen Druckstellen. Diese Strahlvariante wurde in die **Beschädigungsklasse 3** eingestuft.

Zusammenfassend sind die Düsen E2 bei $p = 3$ bar und $h_a = 15$ cm bzw. E3_23 hervorragend für die Reinigung von Kopfsalat ($t_v = 15$ sec), geeignet (**Strahlwirkungsklasse 2**).

b. Bleichspargel

Bei Spargel mit größerer Widerstandsfähigkeit gegen Strahldruckbelastung als Kopfsalat kamen weitere Strahlvarianten mit gesteigerter $I_{s,sp,[K]}$ zum Einsatz. Im Waschbereich der Versuchsanlage (siehe **Bild 4.1**) wurde dabei die Düsenanzahl, die Düsenreihenanzordnung und der Arbeitsabstand h_a zwischen 12 bis 20 cm für die Bewertung des Reinigungspotentials von den mit E2 und E3 bei $p = 3$ bar ausgebildeten Strahlen variiert.

Anhang E, Bild E1 stellt repräsentative Fotos von ungereinigten und denselben mit E2 und E3 unter verschiedenen Betriebsparametern gereinigten Spargelstangen dar.

Vergleicht man die Boniturmessungen an den gereinigten Spargelstangen bei unterschiedlichen Prozessparametern miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar:

E3 reinigt besser als E2. Die **Reinigungsklasse 3** wird von E3 in 80% der Fälle erreicht im Vergleich zu E2 mit nur 50 – 60% mäßig gereinigtem Spargel. In der Tendenz nimmt der Reinigungsgrad der Spargelstangen mit der vorrangig durch Vergrößerung des d_d und somit Volumenstromerhöhung hervorgerufenen Steigerung der Reinigungsleistung zu. Es ist jedoch zu beobachten, dass glatte Spargeloberflächen wesentlich leichter zu reinigen sind als strukturierte und raue.

Durch die Minderung der Düsenanzahl auf 8 oberhalb und auf 6 unterhalb des Förderbandes sowie der Anpassung der Düsenreihenanzordnung im Waschtunnel ist ein deutlich verbesserter Reinigungsgrad zu erkennen.

Im Gegensatz zu den mit E2 bei $p = 3$ bar gebildeten Wasserstrahlen ist bei E3 bei ähnlichen Spritzbedingungen ein gesteigerter Effektivitätsgrad der Strahlen bei der Spargelreinigung zu beobachten. Während bei E2 der Anteil der teilweise gereinigten Spargel (**Reinigungsklasse 2**) bei circa 40 % liegt (**Bild 5.32 b**), ist bei E3 ein geringerer Anteil von circa 10 % erkennbar. Diese Steigerung der Strahleffektivität trotz geringerer Düsenanzahl und somit verringerter Strahlwasserdichte im Waschtunnel ist auf abnehmende Strahleninteraktionen mit einhergehender Reduktion der Reibungs- und Dämpfungseffekte zurückzuführen. Die verbesserte Reinigungswirkung des Wasserstrahls bei h_a von 15 cm statt 20 cm kann auch mit der für den Abtrag günstigen Kombination der Wirkmechanismen des Wasserstrahls erklärt werden (vgl. **Abschnitt 3.2.4**).

Bei Betrachtung aller Reinigungsergebnisse mit Spargel wird deutlich, dass nur 30% der Stangen durch Düsenstrahlwäsche vollständig sauber werden. Nach Betrachtung des Reini-

ungsgrads ist es dennoch aus energetischer Sicht sinnvoller, das Reinigungsgut beidseitig mit Wasserstrahlen zu beanspruchen, wobei die Wasserstrahlen der oberen und unteren Düsenreihen sich nicht gegenseitig beeinflussen dürfen. Dieses stellt eine Möglichkeit der Strahlenergiereduzierung dar.

Im Hinblick auf eine effektive und Spargel schonende Reinigung im Reinwasserbetrieb stellt zusammenfassend der unter Einsatz von E3 und $p = 3$ bar ausgebildete Strahl bei einem h_a von 15 bis 20 cm ($t_v = 15$ sec) den optimalen Grenzwert der $I_{s,sp}$ des wirksamen Tropfenstrahls, insbesondere im [K], dar. Zusammenfassend lässt sich unter den konstruktiven und bautechnischen Kennwerten (siehe **Bild 4.2**) in Kombination mit den obigen Betriebsparametern im Spargelreinigungsprozess die Düsenanzahl von 30 auf 14 und damit bis um 45% reduzieren, was demzufolge auch mit einem sinkenden Gesamtwasserverbrauch einhergeht.

Um das an Spargelstangen anhaftende Erdmaterial durch Bildung energetisch wirksamer Strahleigenschaften effizient und produktschonend abzutragen, ist es entsprechend der Reinigungsergebnisse erforderlich, das Strahlreinigen für den definierten Anwendungsfall produkt- und schmutzspezifisch zu optimieren.

c. Möhre

Die Reinigungsversuche bei Möhren wurden mit E3 und E4 unter Variation des p von 3 und 5 bar und des h_a von 10 bis 25 cm durchgeführt. Dabei ist der Blick, insbesondere bei mobilen Düsenwaschmaschinen, auf die Reinigungseffizienz und –effektivität der Wasserstrahlen bei $p = 3$ bar unter Beachtung der Frischwasser- und Energieeinsparung während des Möhrenwaschvorganges gerichtet.

Anhang E, Bild E2 zeigt repräsentative Fotos von ungereinigten und mit unterschiedlichen Strahlvarianten in den Versuchswaschanlagen (**Bild 5.33**) gereinigten Möhren.

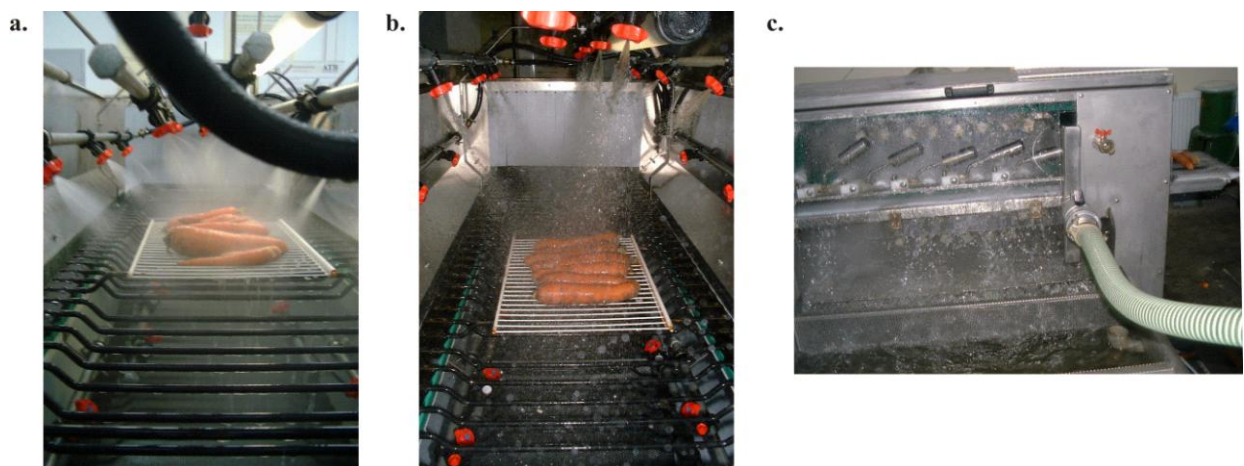


Bild 5.33 *Fotos der Waschbereiche von zwei verwendeten Versuchswaschanlagen während der Reinigungsversuche bei Möhren (siehe Bild 4.4 (a und b) und Bild 4.1 (c))*

Bei der Bewertung der Reinigungsergebnisse aller Versuchsreihen zeigt sich, dass bei Möhren sich der mit der Erhöhung des p von 3 auf 5 bar ergebende Anstieg der Strahlleistung $e_{s,h=0}$ auf die Steigerung der Reinigungseffizienz der Wasserstrahlen nicht so signifikant auswirkt

wie mit der Vergrößerung des d_d von 1,1 mm (E3) auf 1,7 mm (E4). Bei Frischmöhren fällt die Steigerung des Strahlreinigungsgrads durch Vergrößerung der Volumenstromrate Q unter Konstanthaltung des $p = 3$ bar energetisch effektiver und effizienter aus. Folglich ist eine flächendeckende produktschonende Abtragung des anhaftenden Erdmaterials zu beobachten.

Analoges gilt, wie in vorangegangenen Abschnitten erläutert, auch für die Reinigungsgüter Spargel und Kopfsalat, wobei je nach Verschmutzungsgrad und wirkenden Adhäsions- und Kohäsionskräften eine produkt- und aufgabenspezifische Anpassung der Prozessparameter erforderlich ist. Dies belegen die Reinigungsversuche u. a. zum Einfluss der Volumenstromrate Q auf den Beschädigungsgrad und die Abtrags- bzw. Reinigungsergebnisse. Höhere Volumenströme gehen nicht zwangsläufig mit einer Erhöhung des Fluidströmungsanteils einher, sondern können auch eine größere Anzahl von Einzeltropfenschlägen bedeuten.

Vergleicht man den Reinigungsgrad von Frisch- und Lagermöhren und die erforderliche Anzahl der Waschdurchgänge bei Variation der Prozessparameter miteinander, so stellt sich das Ergebnis wie folgt dar (**Anhang E, Bild E2**):

Bei der in **Bild 4.5** mit den technischen Daten gekennzeichneten Waschanlage zeichnet sich bei Frühlmöhren unter Anwendung von E4 und E3 anstatt der original eingebauten Flachstrahldüsen ($d_d = 0,6$ mm; $\theta_{s,h=0} = 120^\circ$) ein steigender Anteil an mäßig gereinigten Möhren ab. Insbesondere bei rauen bzw. strukturierten Gemüseoberflächen wird ein erhöhter Reinigungsgrad unter Anwendung von E4 unter $p = 3$ bar bei Verringerung des h_a von 25 auf 20 cm erzielt. Die Steigerung der Abtrags- und Reinigungswirkung mit abnehmendem h_a um 5 cm ist zurückzuführen auf eine den Eigenschaften des abzutragenden Erdmaterials bzw. zu reinigenden Produkts angepasste Impulsintensität $I_{s,sp}$ der aufprallenden Wasserstrahlen. Erklärbar wird diese ebenfalls mit der Zunahme des zusammenhängenden Strahlanteils mit einhergehender Anhebung des erosiven Anteils und demzufolge einer Reduktion der Tropfenschlagkomponente.

Darüber hinaus ist deutlich zu erkennen, dass zur Erzielung des verbesserten Reinigungsgrads die Verringerung der Düsenanzahl von 40 auf 25 im Waschbereich mit einhergehender Erhöhung des Düsenabstands wesentlich effektiver ist.

Die Reinigungsergebnisse aller Versuchsreihen (vgl. **Bild 5.34** und **Anhang E, Bild E2**) verdeutlichen jedoch, dass bei der Beanspruchung der zu reinigenden Gemüseoberfläche durch Wasserstrahlen nur ein geringer Anteil an vollständig sauber gereinigten Möhren mit **Strahlreinigungsklasse 4** zu beobachten ist. Zur Erzielung dieser Klasse waren je nach Art, Feuchtezustand und Verhalten des abzutragenden Erdmaterials und des Verschmutzungsgrades der zu reinigenden Lagermöhren in Abhängigkeit verschiedener Betriebsparameter bis zu 9 Waschdurchgänge erforderlich.

Eine deutliche Abnahme der Waschdurchgänge ist bei der Anlage (siehe **Bild 4.4**) unter Verringerung des h_a (von 25 auf 20 cm), der Vorschubgeschwindigkeit (von 20 auf 13 cm s⁻¹), der Düsenanzahl (von 40 auf 25 cm) mit eingehender Vergrößerung des Düsenabstands und möglicher Veränderung der Düsenreihenanzahl zu verzeichnen (vgl. **Anhang E, Bild E2 a – c**). Die geschilderten Anpassungen gelten ebenfalls bei der in **Bild 4.1** dargestellten Ver-

suchswaschanlage (vgl. **Anhang E, Bild E2 d**).

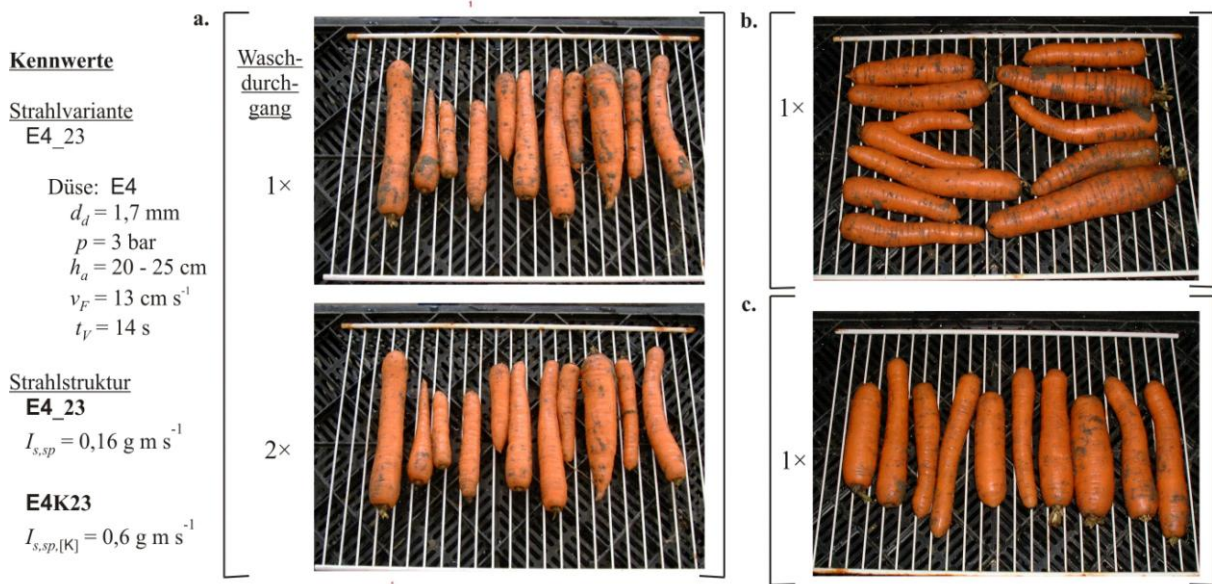


Bild 5.34 Exemplarische Fotos der Reinigungsergebnisse der **Reinigungswirkungsklasse 2** durch Wasserstrahlvariante von mit E4_23 belasteten Möhren nach unterschiedenen Waschdurchgängen: 1- und 2mal

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der mit Wasserstrahlen unter Variation der Düsen- und Betriebsparameter erzielten Reinigungsergebnisse, dass trotz der Reduktion des Wasserverbrauchs eine bedeutende Steigerung der Reinigungswirkung möglich ist.

Unter den untersuchten Spritzbedingungen zur effizienten und Möhren schonenden Reinigung stellt die Wasserstrahlenvariante E4_23 den optimalen Grenzwert der $I_{s,sp}$ der wirksamen Tropfenstrahlen, insbesondere im [K], dar. Die durch den Aufprall des mit E3 bei $p = 5 \text{ bar}$ bzw. mit E4 bei $p = 3 \text{ bar}$ gebildeten Strahlen in $h_a = 15 \text{ cm}$ hervorgerufene Beanspruchung der zu reinigenden Möhren ($t_V = 15 \text{ sec}$) stellt den kritischen Grenzwert der $I_{s,sp}$ des wirksamen Tropfenstrahls, insbesondere im [K], dar. So ergibt sich bei Möhren im Vergleich zu Kopfsalat und Spargel eine gesteigerte spezifische Belastung resultierend aus den Makro- sowie Mikrostrukturen der ausgebildeten Wasserstrahlen.

Konstruktive Anpassungen der auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittenen Prozessparameter, u. a. Düsenanzahl, -anordnung, Vorschubgeschwindigkeit, Verweilzeit t_V , sind im Hinblick auf die Steigerung des Strahleffektivitätsgrades und der Strahleffizienz sowie die Frischwasser- und Energieeinsparung möglich.

5.3. Kombination der für die Gemüesewäsche relevanten Einflussparameter

Bezüglich der Grundlagenuntersuchungen unter Laborbedingungen wurden die spezifischen Druckbelastungen der wirkenden Strahlsegment- und Tropfenaufschläge pro Flächen- und Zeiteinheit sowie die sich daraus ergebenden Abtragswirkungen auf den beanspruchten Standardtestkörper in Beziehung gesetzt (vgl. **Abschnitt 4.2**). Um diese Beziehung um die Anforderungen an den Strahl für die Gemüesewäsche zu erweitern, werden produktspezifisch für

Salat, Spargel und Möhren drei Klassen der Strahlreinigungswirkung festgelegt (vgl. **Abschnitt 4.3**). Verschiedene auf die Materialoberfläche wirkende Strahlbereiche mit unterschiedlichen Belastungsanteilen (vgl. **Bild 3.3**) werden in Abhängigkeit von d_d , p und h_a gebildet (vgl. **Abschnitt 3.4**). Zwischen den Strahlzonen sind, wie im **Abschnitt 3.2.3** erläutert, Unterschiede in Mikro- bzw. Makrostruktur und daher in Belastungsart, -höhe und Energieeintragssumme pro Flächen- und Zeiteinheit festzustellen. Bedingt durch variierende Strahldichte und -aufprallwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ liegen teilflächenbezogen unterschiedliche Wirkmechanismen (vgl. **Abschnitt 3.2.4**) bzw. spezifische Impulsintensitäten $I_{s,sp,h=f(z)}$ und die daraus resultierenden Höhe der Materialbeanspruchung vor.

Bei der Klassifizierung der Strahlwirkungsklassen wurde daher über die Dauer t_b von 10 bis 15 s die wirkende spezifische Belastungs- bzw. Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$ als Summe der Impulspotentialen der abtragswirksamen Tropfengrößenklassen ($d_t \geq 300 \mu\text{m}$) herangezogen (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.2**). Wie auch viele Autoren (u. a. Liu 2000, Milchers 2001) berichten, sind dabei Tropfen mit $d_t < 300 \mu\text{m}$ als nicht abtragswirksam angenommen. Diese Annahme konnte anhand der experimentellen Strahluntersuchungen (vgl. **Abschnitt 5.2.1.3**) bestätigt werden.

Wie in **Bild 3.5** und **Bild 3.6** dargestellt, sind bei effektiver und effizienter Anwendung des Niederdruckstrahls den zu reinigenden und abzutragenden Materialien angepasste Druckbelastungen bzw. Verweilzeiten t_v als Folge der relevanten Düsen- und Betriebsparameter (insbesondere d_d , p und Vorschubgeschwindigkeit) erforderlich. Diesbezüglich wurden die produktspezifischen Beschädigungswerte der Belastungs- bzw. Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$, insbesondere im [K], (**Strahlwirkungsklasse 3**) bestimmt (vgl. **Abschnitt 5.2.2**).

In **Bild 5.35** ist die t_a über $I_{s,sp,h=f(z)}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen und parallel dazu die Schädigungsgrenze der verschiedenen Gemüse aufgetragen. Die Darstellung bietet die Möglichkeit, eine objektive Bewertung der einzusetzenden Düsen- und Betriebsparameter vorzunehmen.

Für Strahlreinigen von jung geerntetem Kopfsalat ohne wesentliche Qualitätsbeeinträchtigung sollte E2 ($d_d = 1,1 \text{ mm}$) unter $p = 2,5 \text{ bar}$ gewählt werden. Beim Waschen von frischen Spargelstangen und Möhren können dagegen die Parameter d_d und p gesteigert werden. Im Hinblick auf eine produktschonende Spargel- und Möhrenreinigung liegen die Grenzen für eine Beschädigung der Gemüse bei Strahlvarianten mit $I_{s,sp,[K]} \geq 0,55 \text{ g m s}^{-1}$ (E3K15, E4K23) bzw. $I_{s,sp,[K]} \geq 0,61 \text{ g m s}^{-1}$ (E4K13, E4K25). Aufgrund der größeren Widerstandsfähigkeit gegenüber der Strahlbelastung vertragen Möhren eine 1,7 bzw. 1,2fach gesteigerte Impulsintensität $I_{s,sp,[K]}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen als Kopfsalat und Spargelstangen (vgl. **Abschnitt 5.2.3**).

Unter den untersuchten Spritzbedingungen schädigen Flachstrahldüsen mit $\theta_{s,h=0} < 90^\circ$, insbesondere $\theta_{s,h=0} = 60^\circ$, die Produktoberfläche (vgl. **Abschnitt 5.2.1.2**).

Der beschriebene, produktspezifische Verlauf des h_a und Q als Funktion des p und d_d sowie der Vorschubgeschwindigkeit wird mit der Optimierung der an Gemüse- und Schmutzeigen-

schaften angepassten Strahlzonen und der daraus resultierenden Belastungsart und –höhe des Wasserstrahls erklärbar.

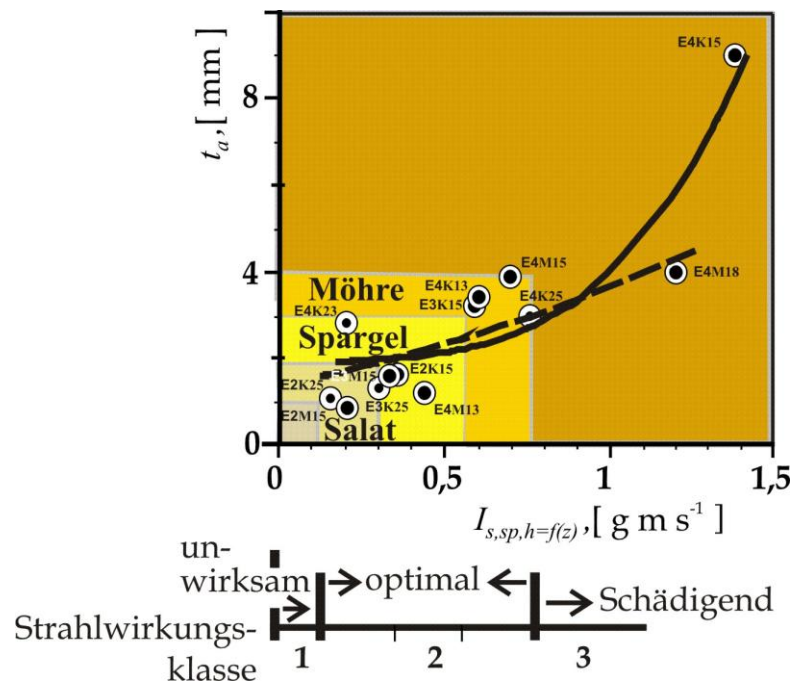


Bild 5.35 Klassifizierung und Zuordnung der abtrags- und reinigungsrelevanten Strahlparameter (Impulsintensität $I_{s,sp}$) in Bezug auf die Abtrags- (Abtragstiefe t_a) und produktspezifischen Beschädigungspotentiale bzw. die Reinigungseffektivität der Strahlen an zu reinigenden Frischgemüsen

5.4. Bewertungsschlüssel der Waschdüsen und Strahlvarianten für bestimmte produktbezogene Einsatzgebiete

Neben Ermittlung der produktspezifischen Belastungsgrenzen und grundlegender Analyse der Wirkzusammenhänge beim Abtrags- bzw. Reinigungsprozesse von Gemüse mit Niederdruckstrahlen ist es entscheidend, Hilfestellungen zur Auswahl geeigneter Düsen bzw. Düsenkonfigurationen unter Definition der aufgabenorientierten Einstellgrößen der Betriebsparameter zu konzipieren.

Mit Hilfe von Niederdruckwasserstrahlen ist es grundsätzlich möglich, nahezu jedes Frischgemüse zu reinigen. Das Einsatzspektrum der Strahlen im Reinigungsprozess beruht auf einer aufgabenorientierten Optimierung der abtragsrelevanten Prozessparameter.

Für mobile Feldwascheinheit, ähnlich wie bei stationären, hat der Gesamtwasserverbrauch höchste Priorität. Außerdem gilt es, den Energieverbrauch zu berücksichtigen.

Nach **Bild 3.5** und **Bild 3.6** verlangt die Auswahl der relevanten Reinigungsprozessparameter stets eine Abwägung unterschiedlicher Kriterien.








































Die Strahlenanalyse bezüglich ihrer Gemüseschädigungen und Abtrags- bzw. Reinigungswirkung zeigt deutlich (vgl. **Abschnitt 5.2**), dass die Wirkung einzelner relevanter Prozessparameter nur im Zusammenhang mit den anderen, untereinander agierenden Parametern beurteilt werden kann. Demzufolge werden die ausgebildeten Strahlzonen und folglich die spezifi-

sche Belastung bzw. Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$ als eine Funktion des d_d und p (bzw. Q) unter Einbeziehung des h_a und t_v bewertet.

Die Schädigung am Produkt bzw. der Effektivitäts- und Effizienzgrad im Strahlreinigungsprozess hängen von der zum Auflösen der Materialstruktur bzw. zum Abtragen notwendigen spezifischen Strahlbelastung und vom strahlinternen bzw. vom Material abhängigen Reibungs- und Dämpfungsenergieanteil ab.

Auf Grundlage der erzielten Abtrags- und Reinigungsergebnisse wurde ein Bewertungsschlüssel anhand definierter Waschdüsen unter praxisnahen Betriebsbedingungen erarbeitet. Die an einzelne Anwendungsfälle angepassten Strahlvarianten sind unter Angaben der relevanten Düsen- (d_d) und Betriebsparameter (p , h_a und t_v) dargestellt.

Dabei wird in **Tabelle 5.8** die $I_{s,sp,[K]}$ der wirksamen Strahlsegmente in Beziehung zu einer der effektiven und effizienten Gemüsewäsche gesetzt, unter Berücksichtigung der produktspezifischen Beschädigungsgrenze.

Strahl- variante	$I_{s,sp,[K]}$ g m s^{-1}	Kopfsalat	Spargelstange	Möhre
E2K13	--			
E2K15	0,36			
E2K25	0,16			
E3K13	--			
E3K15	0,58			
E3K23	--			
E3K25	0,31			
E4K13	0,60			
E4K15	1,39			
E4K18	1,74			
E4K23	0,20			
E4K25	0,75			
E4K28	1,19			

geeignet
 geeignet mit Einschränkung
 ungeeignet

Tabelle 5.8 Bewertungsschlüssel von Düsen und Wasserstrahlvarianten

Kennwerte zur Auswahl geeigneter Waschdüsen unter Angaben der aufgabenorientierten Betriebsparameter unter praxisbezogenen Spritzbedingungen im Hinblick auf eine effektive, effiziente und produktschonende Gemüsewäsche

Die Effektivität und Strahleffizienz hängen primär von den Parametern im Strahlbildungsprozess einschließlich der Strahlauflaufgeometrien ab. In Abhängigkeit von h_a sind die spezifische Energieeintragssumme und das Zusammenwirken der verschiedenen Wirkmechanismen im Reinigungsprozess abtragsmaterial- und produktspezifisch anzupassen, bedingt durch Kombination der Stoß- und Staudruckanteile des Strahls (vgl. **Abschnitt 3.2.4**).

In diesem Zusammenhang kann geschlussfolgert werden, dass es bei jeder Waschdüse einen optimalen Arbeitsabstand h_a gibt. Dazu sollte eine Flachstrahldüse mit einem Strahlwinkel

$\theta_{s,h=0} = 90^\circ$ eine Volumenstromrate $Q \geq 4$ l/min bei $p = 3$ bar haben, um eine ausreichend hohe Effektivität über die gesamte Spritzbreite $b_{s,1}$ und -tiefe $b_{s,2}$ zu erzielen. Dies äußert sich in einer abtragswirksamen Strahlbildung mit einer zur reinigenden Wirkung erforderlichen $V_{s,sp}$, $C_{s,sp}$ sowie $I_{s,sp,h=f(z)}$ der wirksamen Strahlsegmente bzw. Tropfen (vgl. **Abschnitt 3.5**).

Als quasi geeignete Flachstrahldüse wird für das Gemüsereinigen die Düse E3 vorgeschlagen, die bei $p = 3$ bar, einem h_a von 10 bis 20 cm und einer t_v von 10 bis 15 s sowohl im [K] als auch im [M] weitgehend effektiv wäscht (vgl. **Abschnitt 5.2.1.1**).

Wie in **Abschnitt 5.2.3** und **Abschnitt 5.3** erläutert, zeigt der Vergleich zwischen den Gemüsearten *Kopfsalat*, *Spargel* und *Möhre* Unterschiede in der produktspezifischen Widerstandsfähigkeit gegen Wasserstrahlen. Bei Möhren und Spargelstangen ist somit eine wesentlich höhere spezifische Strahlleistung im Reinigungsprozess möglich als bei Kopfsalat. Dabei ist es jedoch energetisch wesentlich sinnvoller, eine Leistungserhöhung durch Vergrößerung der Volumenstromrate Q als durch p durchzuführen.

Bei Kopfsalat findet bei $p = 2$ bis 3 bar bei zusammenhängendem Strahl ($I_{s,sp} < 0,35$ g m s⁻¹) und einer aus dem radialen Abströmen des Fluids resultierenden Schubbeanspruchung eine mäßige bis saubere Reinigung (**Reinigungsklasse 3**) statt. Damit ist der sichere Abtrag des leicht an Salaten anhaftenden Erdmaterials gegeben.

Bei Reinigung von Spargelstangen und Möhren fällt die Produktbeanspruchung durch den Strahlaufprall mit $I_{s,sp} < 0,55$ g m s⁻¹ bzw. $I_{s,sp} < 0,61$ g m s⁻¹ höher aus als bei Kopfsalat. Dies wird insbesondere durch die gemischten Wirkungsmechanismen aus Staudruckbelastung des zusammenhängenden Strahls und der Mehrfachtropfenschläge des kompakten Strahlanteils bewirkt (siehe **Abschnitten 3.2.2, 3.2.2** und **3.2.4**; vgl. **Bild 3.3**). Dies bedeutet, dass Düsen- und Betriebsparameter (d_d , p , h_a und t_v) an jede Waschaufgabe spezifisch anzupassen sind.

Nach Bewertung der Ergebnisse (vgl. **Abschnitt 5.2.3**) zeigt sich jedoch, dass mittels Düsenwaschmaschinen im Durchlaufverfahren nur ein geringer Anteil des gereinigten Gemüses ohne wesentliche Qualitätsbeeinträchtigung sauber wird (**Reinigungsklasse 4**).

Für den Einsatz in Praxisanlagen sind daher zusätzliche Maßnahmen wie beispielsweise Einweichen vor dem eigentlichen Waschprozess oder die Verwendung von mechanischen Reinigungsverfahren wie Bürsten, wo möglich, vorzusehen.

Aufgrund der Unterschiede in der Oberflächeneigenschaft, der Adhäsionskraft zwischen Erdmaterial und Gemüseoberfläche und im Verschmutzungsgrad ist mit den hier angewendeten Düsen bzw. Strahlvarianten mit $t_v = 11$ bis 14 s eine effektive Reinigung nur bei Kopfsalat zu beobachten.

Darüber hinaus zeigen mit Flachstrahldüsen ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) ausgebildete Strahlen im Hinblick auf Reinigungseffektivität und Strahleffizienz deutliche Überlegenheit gegenüber denen mit Vollkegeldüsen (vgl. **Abschnitt 5.2.1.3**).

Bei der Charakterisierung der abtragsrelevanten Strahlbildungen hat die teilflächenbezogene Strahlenanalyse (vgl. **Abschnitt 4.2.2.2**) gezeigt, dass die Makro- und Mikrostrukturda-

ten und damit die Abtrags- und Reinigungseffektivität und Strahleffizienz vom Kernbereich [K] radial zum Randbereich [R] stark abnehmen.

Betrachtet man die ermittelten Flächenverhältnisse zwischen der effektiven Abtragsfläche A_{ae} und der Strahlfläche A_s (siehe **Abschnitt 4.2.2.1.4**) bei den untersuchten Spritzbedingungen, beträgt die Flächenratio $\xi_{ae,h=f(z)}$ minimal ca. 13% (siehe **Tabelle 5.5, Bild 5.12 und 5.14**). Demzufolge sind die mit den definierten Waschdüsen erzeugten Strahlen ab Strahlzone [M] uneffektiv, dies entspricht einem unwirksamen Strahlvolumenanteil von bis zu 60% (vgl. **Abschnitt 5.1.3 und 5.2.1**). Daraus resultieren im Hinblick auf die Frischwasser- und Energieeinsparung Erforderlichkeiten zur Effizienzsteigerung bezüglich Optimierung der Düsenkonfiguration bei der Strahlausbildung und –ausbreitung.

Außerdem ist aufgrund der geringen Gesamtlänge der Waschbereiche und der damit zusammenhängenden kurzen Verweilzeit t_v die Reinigungseffektivität begrenzt (siehe **Bild 3.6**).

Um am Produkt die für den gewünschten Reinigungsgrad erforderliche, material- und produktspezifische Druckbelastung bzw. die $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente zu erreichen, ist auf die möglichen Reibungs- und Dämpfungsverluste der Strahlen zu beachten, welche zur Minderung der spezifischen Strahlbelastung führen können.

5.5. Hinweise zur Optimierung der Konfiguration der Waschdüsen sowie des Gemüsereinigungsprozesses und zur konstruktiven Umsetzung

Die im Rahmen dieser Arbeit zu beantwortenden Fragen beziehen sich zum einen auf das grundsätzliche Verständnis zwischen Düse und spezifischer Impulsintensität $I_{s,sp,h=f(z)}$ und zum anderen auf die aufgabenbezogene Optimierung der Abtrags- und Reinigungsstrahlen bzw. die praktische Umsetzung für die Gemüeswäsche.

Nach Untersuchung der derzeit angewendeten, stationären und mobilen Gemüeswaschmaschinen, sowie nach Auswertung und Interpretation der grundlegenden Versuche in dieser Arbeit, steht man in der konstruktiven Realisierung einer spezifischen Strahlreinigungseinrichtung im Niederdruckbereich noch völlig am Anfang. Die eingesetzten Niederdruckkomponenten wurden bisher nur „nach Gefühl“ zusammengestellt und sind auf die Erfordernisse der abtrags- und reinigungstechnischen Einsatzfälle nur unzulänglich zugeschnitten.

Beim Gemüsereinigungsprozess in vielen Waschmaschinen zeigt sich deutlich, dass die eingebauten Düsen nicht an die Eigenschaft des abzutragenden Erdmaterials und des Produkts angepasst sind (siehe **Abschnitt 1**). Im Waschtunnel sind die aus der hohen Düsenanzahl und den geringen Düsenabständen resultierenden, erhöhten Strahldichten sowie Interaktionen der aus benachbarten Düsen gebildeten Freistrahlen (siehe **Bild 5.33**) zu beobachten. Dies führt, wie auch beim Strahlaufprall auf den auf Materialflächen befindlichen Wasserfilm (vgl. **Abschnitt 3.2.3**), zur Dämpfung der Aufprallwirkung.

Außerdem wird aus den teilflächenbezogenen Bewertungen der gebildeten Makro- und Mikrostrukturen und der Effektivitäts- und Effizienzgrade verschiedener Strahlvarianten (siehe **Abschnitt 4.2.2.2**) deutlich, dass Düsen zur Ausbildung von gleichmäßig über die Spritzbreite $b_{s,1}$ abtragende Niederdruckstrahlen angepasst werden müssen. Die Anforderung liegt da-

rin, dass teilflächenbezogen eine quasi gleichmäßige Verteilung der Mikrostrukturen und somit der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ bzw. Druckbelastung der abtragswirksamen Strahlsegmente und Tropfen erfüllt wird.

In Zusammenhang mit den gewünschten Leistungsanforderungen in der Praxis ist damit die Abstimmung der Düsen- und Betriebsparameter p und h_a erforderlich, da die Wirkung einzelner Reinigungsprozessparameter nur im Zusammenhang mit allen anderen Parametern beurteilt werden kann (siehe **Abschnitt 5.1** und **Abschnitt 5.2**).

Sowohl bei der Spargelwaschmaschine von HEPRO (siehe **Bild 4.1**) als auch der mobilen Feldmöhrenwaschanlage von Hagenlocher (siehe **Bild 4.4**) ist mit verringerter Düsenanzahl einhergehend mit geringem Gesamtwasserverbrauch und düsenspezifisch optimierten Düsenabständen, eine deutliche Steigerung der Strahlreinigungseffektivität zu erreichen (vgl. **Abschnitt 5.2.3**). Bei der Spargelwaschanlage führt die Halbierung der Anzahl der eingesetzten Flachstrahldüsen E2 ($d_d = 1,1 \text{ mm}$, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) einhergehend mit vergrößertem Düsenabstand bis 30 cm und veränderter Anordnung der Düsenreihen zur Steigerung der Reinigungseffektivität der Strahlen. Hierzu trägt auch die Anhebung der düsenspezifischen Volumenstromrate Q im Bereich (E2) $3,1 \text{ l min}^{-1} \leq Q \leq 4,9 \text{ l min}^{-1}$ (E3) unter $p = 3 \text{ bar}$ bei im Zusammenhang der düsenspezifischen Anpassung des Arbeitsabstands h_a .

Anhand der erzielten Reinigungsergebnisse mittels der mobilen Feldmöhrenwaschanlage (siehe auch **Bild 5.33**) wird dagegen der Reinigungsgrad der mit eingesetzten Agrardüsen ($d_d = 0,6 \text{ mm}$, $\theta_{s,h=0} = 120^\circ$) gebildeten Strahlen, wie auch bereits in **Abschnitt 5.2.1** erläutert, als unwirksam (**Klasse zur Strahlwirkung 1**) eingestuft.

Neben der Optimierung der Düsen- und Betriebsparameter ist auch die Minderung der Düsenanzahl und somit die Vergrößerung des Düsenabstands erforderlich (**Abschnitt 5.2.1 c**) in Kombination mit der Veränderung der Düsenanordnung im Waschtunnel. Somit konnte die Volumenstromrate Q bei verbessertem Reinigungsgrad deutlich bis zu 60% reduziert werden. Zudem ist es aus energetischer Sicht sinnvoller, die Reinigungsprodukte mit Wasserstrahlen aus ober- und unterhalb des Förderbandes angeordneten Düsen zu bespritzen. Dies stellt eine weitere Möglichkeit der Energiereduzierung dar. Dabei ist jedoch eine Düsenanordnung ohne gegenseitige Störung der gebildeten Strahlen anzustreben.

Ob die Niederdruckstrahlen eine reinigende Wirkung der Gemüseoberfläche ausüben können, ist im Wesentlichen von den Schmutz- und Produkteigenschaften, der angepassten spezifischen Belastungsart und -höhe und dem Zusammenwirken der relevanten Düsen- und Betriebsparameter abhängig. Dabei müssen die Gestaltung der Prozesse *Fördern* und *Reinigen* in Kombination betrachtet werden, auch durch die optimale Abstimmung dieser Komponenten auf den erforderlichen Reinigungswasservolumenstrom und das Spritzdruckniveau.

Die konstruktiven Maßnahmen der Optimierung der Düsenanzahl, des Düsenabstandes sowie der Anordnung der Düsenreihen im Waschtunnel zielen auf das Reduzieren der strahleninternen Reibungs- und Dämpfungsanteile durch Strahleninteraktionen. Dabei bestehen unter Beachtung der gewünschten Effektivität und Effizienz der Reinigungsstrahlen Einsparpotentiale des Gesamtwasser- und Energieverbrauchs, welche aus ökonomischen und ökologischen

Gesichtspunkten immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Um die Gemüsewäsche bei schwierig zu reinigenden Arten, wie Spargel oder Möhren, gründlicher, produktschonend, wasser- und energiesparend und möglichst kostengünstig zu gestalten, ist die Zuhilfenahme von und Kombination mit mechanischen Bauelementen wie z. B. mit Bürsten ratsam.

6. Zusammenfassung

In der derzeitigen Praxis werden Gemüsearten überwiegend mit sehr vielen Düsen und somit hohem Wasser- und Energieverbrauch gewaschen. Zur Anwendung kommen vorwiegend Pflanzenschutz- bzw. Agrar- und Industriedüsen mit hohem Strahlwinkel $\theta_{s,h=0}$.

Eine effektive und effiziente Gemüsereinigung mittels Wasserstrahlen muss jedoch eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Hierzu stellt der Niederdruckwasserstrahl ein anpassungsfähiges Werkzeug dar, das je nach Betriebsparameter in seiner Wirkungsweise veränderlich ist. Dabei verlangt die Auswahl der relevanten Prozessparameter stets eine Abwägung unterschiedlicher Kriterien.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind folgende Fragen zu beantworten: Wie wirken sich die Düsen- und Betriebsparameter, u. a. die Auswahl und Konfiguration der Düsen, der Spritzdruck p , die Volumenstromrate Q und der Arbeitsabstand h_a auf die Strahlstrukturen aus? Wie kann das Strahlreinigen für die Gemüsewäsche optimiert und praktisch umgesetzt werden, um das Erdmaterial vom Gemüse durch Bildung energetisch wirksamer Strahleigenschaften effektiv, effizient und produktschonend abzutragen, ohne das Gemüse zu schädigen? Können die einzusetzenden Wasser- und Energieressourcen bei energetischer Optimierung des Gemüsewaschverfahrens eingespart werden? Neben der grundlegenden Betrachtung der Strahlparameter wurde auch die Erstellung eines Bewertungsschlüssels für Düsen bzw. Wasserstrahlen im Gemüsewaschprozess als Ziel formuliert.

Auf der Basis von umfangreichen Literaturstudien zeigt sich, dass die Vielzahl der Prozessparameter die gezielte Einstellung aufgabenspezifischer Strahldruckbelastung erlaubt. Die funktionelle Auswirkung der einzelnen, jedoch interagierenden Prozessparameter kann nur im Zusammenhang mit allen anderen Parametern beurteilt werden. Daher kann die Abtrags- bzw. Reinigungswirkung der Düsen bzw. der ausgebildeten Strahlen nur bei Verknüpfung des Systems „Schmutz-Produktoberfläche“ definiert werden.

Festzustellen ist auch, dass die grundlegenden funktionellen Zusammenhänge zwischen den Parametern des Gemüsewaschprozesses im Niederdruckbereich bisher nicht bekannt waren. Aus den wenigen bekannten wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit der Anwendung von Niederdruckstrahlen zur Gemüsereinigung befasst haben, lassen sich keine Rückschlüsse auf eine anwendungsgerechte Anpassung und Optimierung der Prozessparameter bzw. der Strahlparameter ziehen. Eine aufgabenspezifische Beratung bei der Auswahl von Düsen bzw. zu den Eigenschaften der Reinigungsstrahlen ist somit nicht möglich.

Die ökologische und ökonomische Bewertung des Gemüsewaschprozesses richtet sich auf den effizienten Einsatz der Ressourcen Frischwasser und Energie aus, bei gleichzeitig hohem

Reinigungsgrad und ohne das Gemüse zu schädigen. Dabei müssen technische Maßnahmen zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung der Strahlen durchgeführt werden, um neben der Nutzung des Wasser- und Energieeinsparpotentials im Reinigungsprozess auch dessen kostengünstige Gestaltung in kurzer Reinigungszeit effektiv und produktschonend zu realisieren. Um Strahlen objektiv hinsichtlich ihrer Schädigungs- oder Abtrags- bzw. Reinigungspotentiale bei der Gemüsewäsche beurteilen zu können, wurde eine komplexe Versuchsstrategie verfolgt, die sowohl grundlegende, düsenspezifische Untersuchungen, sowie standardisierte Abtragsversuche auf Testkörpern und Versuche mit Gemüse umfasste (**siehe Bild 6.1**). Die Untersuchungen erfolgten mit 7 Agrar- bzw. Industriedüsen mit unterschiedlichen Strahleigenschaften. In Zusammenarbeit mit dem Düsenhersteller, Fa. Lechler GmbH, Metzingen, wurde eine standardisierte Messprozedur an Niederdruckdüsen zur Charakterisierung der Strahlausbildung, Makro- und Mikrostrukturen sowie zur Strahlbewertung ausgeführt. Parallel dazu wurde ein Prüf- bzw. Versuchsverfahren entwickelt und ein Versuchsstand am ATB aufgebaut, um die Düsen hinsichtlich ihrer wirkungsrelevanten Strahlparameter in Abhängigkeit der unterschiedlichen Düsen- und Betriebsparameter zu bewerten.

Als wesentlichen Schritt dieser experimentellen Untersuchungen wurden standardisierte Testkörper, Sand-Bindemittelgemisch-Platten, zur Ermittlung der hydrodynamischen Aufprall- bzw. Abtragswirkung von definierten Niederdruckstrahlen entwickelt (**siehe Anhang A**) und eingesetzt. Weiterhin wurde neben der Ermittlung der produktspezifischen Empfindlichkeitsgrenzen von Gemüse gegenüber der Druckbelastung auch die reinigende Aufprallwirkung der definierten Strahlvarianten bei der Gemüsewäsche untersucht.

Außerdem war zu untersuchen und zu bewerten, ob die große Wassermenge bzw. Strahldichte und damit die angewendeten Düsen und deren Konfiguration, die in den gegenwärtig verfügbaren Gemüsewaschmaschinen anzutreffen sind, für eine effektive, effiziente und produktschonende Gemüsewäsche geeignet sind. Diesbezüglich wurde in den Versuchsanlagen am ATB, in der Spargelwaschmaschine von HEPRO, Rheda-Wiedenbrück, und der mobilen Feldmöhrenwaschanlage von Hagenlocher, Herrenberg-Gültstein, am Ende des Reinigungsprozesses eine Bonitierung bzw. Abschätzung der Effektivität durchgeführt.

Experimentelle Messergebnisse der Makro- und Mikrostrukturen deuten an, dass die Strahlparameter, wie spezifische Massenstromdichte $C_{s,sp}$ sowie Impulsintensität $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente und Tropfen (Tropfendurchmesser $d_t > 300 \mu\text{m}$) und die Strahlaufprallwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$, vom Strahlkern [K] radial zum Strahlrand [R] stark variieren.

Festzustellen ist auch, dass aufgrund der stark inhomogenen Verteilung der o. g. Strahlparameter der Materialabtrag mit zunehmendem Strahlradius r_s vom Strahlkern [K] deutlich abnimmt. Der effektive Materialabtrag erfolgt insbesondere im Strahlkern [K] durch die zusammenhängende kompakte Strahlzone und durch axial sowie radial wirkende Stoß- und Staudruckanteile einhergehend mit Tropfenschlagbeanspruchung. Mit weiterer Zunahme des Strahlradius r_s ergibt sich eine Verschiebung der Wirkmechanismen hin zu radial wirkenden und abströmenden Strahlanteilen mit verringerter spezifischer Massenstromdichte $C_{s,sp}$.

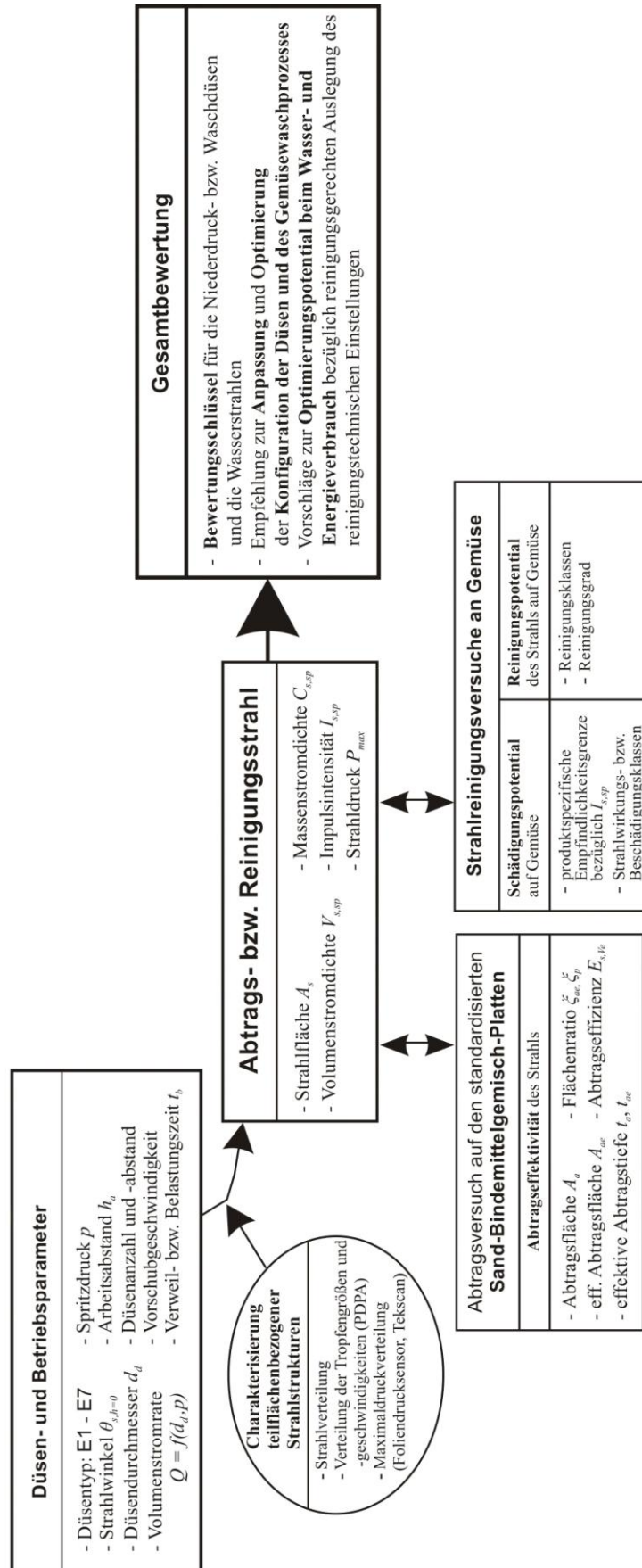


Bild 6.1 Schema der Gesamtversuchsstrategie

Durch miteinander korrelierende Einstellung der relevanten Düsen- und Betriebsparameter (Düsendurchmesser d_d , Spritzdruck p , Volumenstromrate Q , Arbeitsabstand h_a und Belastungsdauer t_b) ist die Höhe der spezifischen Impulsintensität $I_{s,sp}$ der abtragswirksamen Strahlsegmente und Tropfen an jede Aufgabe spezifisch anzupassen. Die bereitzustellende Strahlenergie $e_{s,h=0}$ wird durch den Spritzdruck p und die Volumenstromrate Q des Strahls erzeugt, wobei es jedoch energetisch wesentlich effizienter ist, eine Leistungssteigerung durch Erhöhung des Düsendurchmesser d_d einhergehend mit Vergrößerung der Volumenstromrate Q als durch den Druck p zu erzeugen. Außerdem verdeutlicht die Charaktisierung der abtragswirksamen Strahleigenschaften (u. a. $C_{s,sp}$ und $I_{s,sp}$), dass der optimale Betriebspunkt jeder Niederdruckdüse bei einem bestimmten Arbeitsabstand h_a auftritt.

Dabei ist eine mit den o. g. Parametern (u. a. d_d sowie h_a) abgestimmte Belastungsdauer t_b des Strahls notwendig, so dass die zur effektiven Materialabtragung erforderliche Anzahl und Höhe der spezifischen Strhlaufschläge bzw. Impulsintensität $I_{s,sp}$ pro Zeiteinheit vorliegt.

Werden die düsenspezifischen Strahleigenschaften bei Variation der Betriebsparameter hinsichtlich der Effektivität und Abtragseffizienz betrachtet, so gestaltet sich die Umsetzung der Strahlenergie in effektive Abtragung teilflächenbezogen unterschiedlich ab. Diesbezüglich sind Agrardüsen wie E1 (Flachstrahldüse, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$, $Q = 1,5 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$) aufgrund ihrer energetisch ungünstigen Strahldivergenz einhergehend mit sehr geringer Massenstromdichte $C_{s,sp}$ und Impulsintensität $I_{s,sp}$ für den effektiven und effizienten Strahleinsatz ungeeignet. Für eine effiziente Abtragung bzw. Wäsche ist mindestens eine Volumenstromrate Q von 3 bis 5 l min^{-1} bei $p = 3 \text{ bar}$ als Mindestwert zur teilflächenbezogenen Ausbildung eines energetisch wirksamen Wasserstrahls in $h_a = 10 \text{ cm}$ und $t_b = 10$ bis 15 s notwendig.

Mit der Verdopplung auf $h_a = 20 \text{ cm}$ erhöht sich der Mindestwerte für Volumenstromrate Q auf $\geq 6,2 \text{ l min}^{-1}$.

Als quasi geeignete Flachstrahldüsen werden die Düse E3 (Flachstrahldüse, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$, $Q = 4,9 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$) in Arbeitsabstand $h_a = 10 \text{ cm}$ sowie E4 (Flachstrahldüse, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$, $Q = 7,2 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$) in Arbeitsabstand $h_a = 20 \text{ cm}$ für eine effizientere Materialabtragung, im Wesentlichen in Strahlkern [K] und Strahlmitte [M], vorgeschlagen. Durch die mit Flachstrahldüsen wie E2 (Flachstrahldüse, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$, $Q = 3,1 \text{ l min}^{-1}$ bei $p = 3 \text{ bar}$), E3 und E4 im Strahlrand [R] gebildeten Strahlen in h_a bis 20 cm werden die standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten nicht effektiv abgetragen, dies entspricht einem unwirksamen Strahlvolumenanteil bis 60%.

Die Flachstrahldüsen sind jedoch bei vergleichbaren Spritzbedingungen für einen effizienten und effektiven Einsatz im Abtragsprozess geeigneter als die Vollkegeldüsen.

Es ist festzustellen, dass sich die alleinige Betrachtung des Abtragsvolumens auf den standardisierten Sand-Bindemittelgemisch-Platten als einfach nachvollziehbare Methode anbietet, um die Niederdruckdüsen bzw. die gebildeten Wasserstrahlen zu vergleichen und zu bewerten.

Entsprechend der Abtrags- und Reinigungsergebnisse ist dennoch zu beachten, dass mit der

Erhöhung der Volumenstromrate Q sich der Strahlwinkel $\theta_{s,h=f(z)}$ verringert, was in der Summe mit einer Steigerung der Strahldichte einhergeht. Dies führt einerseits aufgrund des auf den Testkörpern bzw. dem Gemüse befindlichen Wasserfilms zur Dämpfung der Aufprallwirkung und andererseits führen die Strahlinteraktionen zu ansteigenden Reibungs- und Dämpfungseffekten und somit zur Verringerung der Effektivität und Effizienz der Strahlen.

In Abhängigkeit des zu reinigenden Produkts bzw. der Eigenschaften des abzutragenden Erdmaterials beruht die effiziente Strahlanwendung auf der Anpassung und Optimierung der relevanten Düsen- und Betriebsparameter und den daraus resultierenden spezifischen Druckbelastungen. Der praktischen Anwendung der Wasserstrahlen im Gemüseeinigungsprozess sind somit durch die Empfindlichkeit der zu reinigenden Gemüseoberflächen Grenzen gesetzt. Gemäß der Strahlschädigungsgrenzen der Gemüsearten, Kopfsalat, Spargel und Möhren wurden im Rahmen der optimalen Strahlwirkungsklasse die produktspezifischen $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente als Folge bestimmter relevanter Düsen- und Betriebsparameter (d_d , p , h_a) festgelegt.

Diesbezüglich wurde ein auf den Grundlagenuntersuchungen basierender Bewertungsschlüssel für Düsen und Strahlvarianten erarbeitet. Damit ist es möglich, die aufgabenspezifische $I_{s,sp}$ der wirksamen Strahlsegmente unter Angaben der relevanten Düsen- und Betriebsparameter für eine effektive und effiziente Gemüsewäsche zu definieren.

Entsprechend der Ergebnisse bezüglich der Schädigungs- und Reinigungspotentiale der Strahlen ist ersichtlich, dass aufgrund der größeren Widerstandsfähigkeit gegenüber der Strahlbelastung Möhren eine 1,1 bzw. 1,7fach gesteigerte Impulsintensität $I_{s,sp}$ vertragen als Kopfsalate und Spargelstangen.

Die Düsen E2 bei $p = 3$ bar und $h_a = 15$ cm bzw. E3 bei $p = 3$ bar und $h_a = 20$ cm sind hervorragend für die Reinigung von Kopfsalat ($t_v = 15$ sec) geeignet. Im Hinblick auf eine effiziente und Spargel bzw. Möhren schonende Reinigung stellen die Düse E3 bei $p = 3$ bar und h_a von 15 bis 20 cm und E4 bei $p = 3$ bar und $h_a = 20$ cm den oberen Grenzwert der Impulsintensität $I_{s,sp}$ des wirksamen Tropfenstrahls dar. Die Beanspruchung von Kopfsalat ist durch den zusammenhängenden und daraus radial abströmenden Strahl und von Spargel und Möhren durch die Mischung des zusammenhängenden Strahls und der Mehrfachtropfenschläge des kompakten Strahls produktschonend und optimal reinigend. Dies bedeutet, dass hinsichtlich der produktspezifischen Gestaltung der Prozesse in den Waschanlagen Düsen- und Betriebsparameter an jede Waschaufgabe spezifisch anzupassen sind.

Für die Umsetzung der Ergebnisse auf Düsenwaschmaschinen ist anzustreben, den Verlust an strahlinternen sowie am Aufprallmaterial vorherrschenden Reibungs- und Dämpfungsenergieanteilen möglichst zu minimieren.

In diesem Zusammenhang sind konstruktive Maßnahmen zur Optimierung der Düsenanzahl, des Düsenabstandes sowie der Anordnung der Düsenreihen erforderlich.

Durch aufgabenspezifische Anpassung und reinigungstechnische Optimierung der Konfiguration des Gemüseeinigungsprozesses ist neben der gewünschten Steigerung der Effektivität und Effizienz der Reinigungsstrahlen eine deutliche Einsparung des Gesamtwasser- (bis 60%)

und Energieverbrauchs möglich, welche aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Um die Gemüsewäsche bei schwierig zu reinigenden Arten, wie Spargelstangen oder Möhren, gründlicher, produktschonend, wasser- und energiesparend und möglichst kostengünstig zu gestalten, ist eine Kombination mit mechanischen Bauelementen wie z. B. Bürsten ratsam. Außerdem ist den Düsenherstellern zu empfehlen, die Düsen im Hinblick der Ausbildung von Strahlteilflächen mit quasi optimaler Verteilung der Makro- und Mikrostrukturen anzupassen.

7. Literaturverzeichnis

- Astachow A.; Krüger G.; Fitzky G.; Köster C. (1996).** Kraftstoffzerstäubung: Untersuchung der Zerstäubung von Schwerölen bei Variation der Einspritzbedingungen. Abschlussbericht, FVV, Heft 627
- Adler W F. (1979).** The mechanics of liquid impact. In: Treatise on Materials Science and Technology, Preece C M, ed., 16, 127-183
- Arai M.; Tabata M.; Hiroyasu H. (1984).** Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle. SAE Paper 840275
- Beutin E F. (1975).** Flüssigkeitsschlag, Grundlage der Beanspruchung und ihre technische Nutzanwendung. Dissertation, TU Hannover
- Beutin E F.; Erdmann-Jesnitzer F.; Louis H. (1977).** Grundlagen der Anwendung von diskontinuierlichen Flüssigkeitsstrahlen hoher Geschwindigkeit. Werkstatt und Betrieb, 110 (6), 369-373
- Böttcher H. (1994).** Physiologisches Verhalten von Gemüse nach der Ernte. Reihnische Monatsschrift 12, 648-649
- Brandt S T.; Louis G.; Meier G.; Tebbing G. (1995).** Fields of Application for Abrasive Water Suspension Jets of Pressures from 15 to 200 MPa. In: Proceedings of the 8th American Water Jet, Houston, Paper 15, 207-217
- Brandt S T.; Louis G. (2001).** Effects of nozzle wear by using abrasive water suspension jets. Proceedings of 2nd International Conference on water jet Maching: WJM 2001, Cracow
- Brandt S T.; Choung P T.; Mohamed F.; Pude F.; Schenk A. (2002).** Wasser-technologie im 21. Jahrhundert. Ein Ausblick auf Fortschritt und künftige Entwicklungsfelder. ICCT 2002: Internationale schneidtechnische Tagung, Vorträge, Hannover
- Brunton J H.; Rochester M C. (1979).** Erosion of solid surfaces by the impact of liquid drops. In: Treatise on Materials Science and Technology, Preece C M, ed., 16, 185-248
- Cheroudi B.; Onuma Y.; Chen SH.; Bracco F V. (1984).** On the Intact Core of Full-Cone Sprays. SAE Paper 850126
- Conn A F. (1992).** Water Jet Cleaning for In-Factory Applications. In: Proceedings of the 11th International Conference on Jet Cutting Technology in St. Andrews, 443-450
- Cossali G E.; Brunello G.; Coghe A.; Marengo M. (1999).** Impact of single drop. On a liquid film: Experimental analysis and comparison with empirical models. In: Proceedings of Italian Congress of Thermofluid Dynamics UIT, Ferrara
- Damaschke N. (1999).** Grundlage der PDA-Messtechnik, Kurzlehrgang: Strömungstechnik in der industriellen Forschung. TU Darmstadt, Germany
- Dombrowski N.; Johns W R. (1963).** The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. Chem. Eng. Science, Vol. 18 (5), 2032-214
- Dombrowski N.; Munday G. (1968).** Spray Drying, Biochemical and Biological Engineering Science. Vol. 2, Chapter 16, Academic Press, New York, pp. 209-320

- Fath A. (1997).** Charakterisierung des Strahlaufbruch-Prozesses bei der instationären Druckzerstäubung. Bericht zur Energie- und Verfahrenstechnik, 97 (3), Erlangen
- Fraser R P.; Eisenklam P.; Dombrowski N.; Hassan D. (1962).** Droplet formation from rapidly moving liquid sheets. AICHE Journal, Vol. 8 (5), 672-680
- Frohn A.; Roth N. (2000).** Dynamics of Droplets. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-65887-4
- Gebhardt H. (1958).** Zerstäubung mit Dralldüsen. Scientific Journal of the Technical University Dresden, 7, 249-273
- Geyer M. (1996).** Wasseraufbereitung bei Gemüsewaschmaschinen. Forschungsbericht des ATB 96 (6)
- Geyer M (1997).** Porreeputz- und Waschanlage nach neuem Konzept. Gemüse 4, S. 257
- Geyer M.; Herold B.; Studman C J. (1998).** Fruit contact pressure distributions. Conference Proceedings Ag Eng 98: Oslo, Paper 98-F-001
- Geyer M. (1999).** Gemüsereinigung, KTBL Publikation 384, Darmstadt
- Giles D K.; Ben-salem E. (1992).** Spray Droplet Velocity and Energy in Intermittent Flow from Hydraulic Nozzles. Journal of Agricultural Engineering Research 51, 101-112
- Golacki K. (1993).** Carrot root resistance to impact loading in relation to root moisture content and water potential. Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych 399, 77-81
- Grangler A.; Enders R.; Jekel M. (2001).** Energie- und Stoffströme in der Wasserver- und Abwasserentsorgung. In: Weigert, B. & Steinberg, Ch. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung in der Wasserwirtschaft - Konzepte, Planung und Entscheidungsfindung. Interdisziplinäre Fachtagung am 27. und 28. Juni 2001 in Berlin. Schriftenreihe des Interdisziplinären Forschungsverbundes Wasserforschung in Berlin, Band 7, S. 103-116.
- Grant R P.; Middlemann S. (1966).** Newtonian Jet Stability. AICHE Journal, Vol. 12 (5), 669-678
- Guo N.-S. (1994).** Schneidprozeß und Schnittqualität beim Wasserabrasivschneiden. Dissertation TU Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-332802-X
- Haenlein A. (1931).** Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Forsch. Gebiete Ingenieurwesen, Bd. 2 (4), 139-149
- Haferkamp A.; Louis H.; Schikorr W. (1984).** Jet cleaning investigations on polymeric model layers. In: A7, Paper C2, 119-134
- Hammitt F G.; Hwang J B.; Do L.; Huang Y C.; Timm E E.; Hughes R D. (1974).** Experimental and theoretical research on liquid droplet impact. Proceedings of the Second Meersburg Conference on Rain Erosion and Allied Phenomena, 319-345
- Herold B.; Geyer M.; Studman C J. (2001).** Fruit contact pressure distributions equipment. Computers and electronics in agriculture, 32, 167-179
- Herold B.; Truppel I. (2003).** Mikroskopische 3D Oberflächenanalyse an landwirtschaftlichen Produkten. Workshop: Anwendung der Computer-Bild-Analyse in der Landwirtschaft, Universität Bonn

- Herppich W B.; Mempel H.; Geyer M. (1999).** Effects of postharvest mechanical and climatic stress on carrot tissue water relations. *Postharvest Biology and Technology* 16, 43-49
- Heymann F J. (1969).** High speed impact between a liquid drop and a solid surface. *Journal of Applied Physics*, 40, 5113-5112
- Hiroyasu H.; Shimizu M.; Arai M. (1982).** The Breakup of High Speed Jet in a High Pressure Gaseous Atmosphere. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray systems*, 69-74
- Hobbs J M. (1966).** National Engineering Laboratory. Report No. 262
- Hoff G.; Langbein G.; Rieger H. (1967).** ASTM STP 408, p. 42, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- Hohmann S.; Rüger M.; Sommerfeld M. (1994).** Tropfenkoaleszenz in Sprühnebeln: Eine experimentelle und numerische Untersuchung. 1. Workshop über Sprays, Erfassung von Sprühvorgängen und Technologien der Fluidzerstäubung, Universität Erlangen
- Jain N K.; Jain V K. (2001).** Modelling of material removal in mechanical type advanced machining processes: a state-of-art review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 1573-1635
- Kader A A. (1987).** Respiration and Gas Exchange of Vegetables. Weichmann, J. (Ed), Marcel Decker, Inc., New York, Basel, 25-43
- Kang S W.; Reitter T.; Carlson G. (1995).** Target Response on the Impact of High-Velocity Non-Abrasive Waterjet. In: *Proceedings of the 7th American Waterjet Conference Seattle*, Vol. 1, 71-86
- Kaye P L.; Pickles C S J.; Field J E. (1995).** Investigation of erosion processes as cleaning mechanisms in the removal of thin deposited soils. *Wear*, 186 (2), 413-420
- Kluge T.; Lux A.; Schramm E. (2001).** Markttöffnung in die Trinkwasserversorgung - Entwicklung von Verbraucherschutzpositionen. Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH, Frankfurt am Main
- Krajcinovic D. (1996).** Damage Mechanics. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, USA
- Krautter J.; Vetter K. (1990).** Verbesserung der Reinigungstechnologie beim Einsatz von Hochdruckreinigern mit dem Ziel der Wassereinsparung und Wasserwiederverwendung. BMFT-Forschungsbericht (02WT 8728/5), Winnenden, Deutschland
- Kretschmer H. (1984).** Leitfaden der Meliorationsbodenkunde. Heft 1-3, Hochschulsstudium: Meliorationsingenieurwesen, Universität Rostock
- Kroos F. (1995).** Randschichtverfestigung durch Hochdruckwasserstrahlen. Dissertation, TU Hannover, VDI-Verlag, ISBN 3-18-337502-8
- Krüger G. (1998).** Experimentelle Untersuchungen zur Zerstäubung von Kraftstoff-strahlen unter dieselmotorischen Einspritzbedingungen. Dissertation, Universität Rostock

- Leu M C.; Meng P.; Geskinand E S.; Tismeneskiy L. (1998).** Mathematical modelling and experimental verification of stationary waterjet cleaning process. Transaction ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 570-579
- Li Y.; Geskin E S.; Gordon E I. (1992).** Investigation of the Pure Waterjet-Workpiece Interaction. In: Proceedings of 11th International Symposium on Jet Cutting Technology, Dordrecht, Netherlands, pp. 3-15
- Ligocki A. (2005).** Schneiden landwirtschaftlicher Güter mit Hochdruckwasserstrahl. Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, ISBN 3-8322-3941-3
- Linke M. (1997).** Modelling and Predicting the Postharvest Behaviour of Fresh Vegetables. In: Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture (Munack & Tantau, Eds.) Pergamon Press, Oxford, UK, 283-288
- Linke M. (1998).** Measurement and Modelling of Produce Responses in Post-harvest Effected by Pre-harvest Parameters. In: IFAC/EuraAgEng 2nd International Workshop on Control Applications in Post-harvest and Processing Technology, Budapest, Hungary
- Lipthal M. (2002).** E-Mail-Mitteilung über die Reproduzierbarkeit der Tropfengrößenmessung, Lechler GmbH, Metzingen
- Liu H. (2000).** Science and Engineering of Droplets. Fundamentals and Application, Noyes Publications, New Jersey, USA
- Louis H. (1978).** Beanspruchbarkeit fester Körper durch Flüssigkeitsstrahlen, Habilitationsschrift, TU Hannover
- Louis H.; Milchers W.; Pude F. (1999).** Experimental and theoretical investigation of the decoating process by pure waterjet. 10th American Waterjet Conference, Paper 54, 695-706, Houston, USA
- Louis H. (2000).** Aktueller Stand der Wassertechnik. Institut für Werkstoffkunde IW, Hannover
- Ludewig C. (1998).** Ein Beitrag zur Tropfengrößenbestimmung an Pflanzenschutzdüsen unter besonderer Berücksichtigung des Phasen-Doppler-Meßverfahrens Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Deutschland
- Meng P.; Decarom L S M.; Geskin E S.; Leu M.; Hugang Z. (1997).** Mathematical Modelling of Waterjet Cleaning. In: Proceedings of the 9th American Waterjet Conference in Dearborn, 509-524
- Meng P.; Geskin E S.; Leu M C.; Li F. (1998).** An analytical and experimental study of cleaning with moving waterjets. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 580-589
- Miesse C C. (1955).** Correlation of Experimental Data on the Disintegration of Liquid jets. Ind. Eng. Chem., 47, 1690-1697
- Milchers W. (2001).** Abtrag von Polymeren mit dem reinen Wasserstrahl. VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-363905-X

- Momber A. (1988).** Handbuch Druckwasserstrahl-Technik. Beton-Verlag, Düsseldorf, Germany
- Momber A. (1992).** Untersuchungen zum Verhalten von Beton unter der Belastung durch Druckwasserstrahlen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 4, Nr. 109, VDI-Verlag
- Mönicke R. (1971).** Spezielle Untersuchungen zur Beeinflussung des Effektes von Flüssigkeitsstrahlen bei der Reinigung landtechnischer Arbeitsmittel. Dissertation, Karl-Marx-Universität Leipzig, Germany
- Mulugeta E.; Truppel I.; Geyer M. (2002).** Erzeugung und Auswertung von 2D-Druckverteilungsbildern. Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte, 31, Potsdam-Bornim / Osnabrück, 31-40
- Mulugeta, E.; Geyer, M. (2003).** Optimization of washing processes for vegetable and potatoes – Development of washing nozzles in order to increase washing efficiency of vegetables and potatoes – ASAE Annual International Meeting, 27.-30.07.2003, Las Vegas, Nevada, CD Rom, Paper Number: 036118
- Mulugeta E.; Geyer M. (2005).** Characterising the Washing Processes of Vegetables and Potatoes. Biosystems Engineering, **91** (4), 441-453
- v. Ohnesorge W. (1936).** Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Bd. 11 (2), 355-358
- O'Rourke P J. (1981).** Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays. LA-9069-T, Los Alamos, NM, USA
- Phinney R E. (1966).** The Breakup of a Turbulent Jet in a Gaseous Atmosphere. Journal of Fluids Mechanics, Vol. 88, 119-127
- Plötner K.; Freitag F.; Höhn K. (1991).** Mechanische und nichtmechanische Prinzipie zur Zerkleinerung landwirtschaftlicher Stoffe. Agrartechnik Berlin, 41 (1), 13-15
- Richter T.; Wilhelm S. (1878).** Methoden des Zerstäubens von Flüssigkeitsstrahlen in der Verfahrenstechnik. Maschinen Markt., 97 (11), 26-31
- Rayleigh L. (1878).** On the Instability of Jets. Mathematical Society Proc., Vol. 10 (4), London
- Reitz R D.; Bracco F V. (1982).** Mechanism of Atomization of a Liquid Jet. Phys. Fluids, Vol. 25, 1730-1742
- Rose G. (1997).** Untersuchung zur Reinigung bei der Feldverpackung von Frischgemüse. Dissertation, Universität Hohenheim, Germany
- Ruff G A.; Sagar A D.; Faith G M. (1989).** Structure and Mixing Properties of Pressure-Atomized Sprays. AIAA Journal, 27 (2), 901-908
- Ruff G A.; Bernal L P.; Faeth G M. (1991).** Structure of the Near-Injector Region of Non-Evaporating Pressure-Atomized Sprays. J. Prop. Power, 7, 221-230
- Sandler K. (1976).** Untersuchungen zur Oberflächenhaftung und Abtrennung von Verunreinigungen in Anlagen der Tierproduktion. Dissertation, Technische Universität Dresden, Germany

- Sawamura T.; Kanazawa Y. (2001).** Root Vegetable Washing by Waterjet. Journal of Jet Flow Engineering, 18 (2), 19-25
- Schikorr W.; Louis H. (1982).** Fundamental aspects in cleaning with high speed waterjets. Proceedings of the 6th International Conference on Jet Cutting Technology, 217-228, Gulidford, England
- Schmidt M. (1980).** Einfluss physikalischer Flüssigkeitseigenschaften auf die Zerstäubung im Pflanzenschutz. Dissertation, Universität Hannover
- Schmidt M.; Walzel P. (1984).** Zerstäuben von Flüssigkeiten. Physik in unserer Zeit, 15 (4), 113-120
- Schikorr W. (1986).** Beitrag zum Werkstoffabtrag durch Flüssigkeitsstrahlen hoher Relativgeschwindigkeit. Grundlagen der Landtechnik, 30 (4), 126-134
- Schlussler H J. (1970).** Milchwissenschaft. 25 (3), 133-145
- Schneider T. (1995).** Zur Modellierung der Zerstäubung von Flüssigkeitsfreistrahlen. Dissertation, Universität Dortmund, Germany
- Selcan Z.; Göhlich H. (1982).** Einfluss der Betriebs- und Stoffparameter auf das Tropfengrößenspektrum von Pflanzenschutzdüsen. Grundlagen der Landtechnik 32 (6), 189-194
- Scott J M.; Dunsmore D G.; Keegan M D. (1981).** Spray nozzle performance in cleaning food equipment. Transactions of the ASAE, 24 (2), 526-532
- Shavlovsky D S. (1972).** Hydrodynamics of high pressure fine continuous jets. Paper A6, In: Proceedings of the First International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Brooks T E and Richardson C A, eds., Cranfield, United Kingdom
- Sirignano W A. (1999).** Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays. Cambridge University Press, UK, ISBN 0 521 63036
- Sivakumar D.; Tropea C. (2002).** Splashing impact of a spray onto a liquid film. Physics of Fluids, 14 (12), 85-88
- Skalak R.; Feit D. (1966).** Impact on the surface of a compressible fluid. Transaction ASME, Journal of Engineering for Industry, B 88, 325-331
- Spillman J. (1984).** Spray impaction, retention and adhesion. Pesticide Science, 15, 97-106
- Springer G S. (1976).** Erosion by Liquid Impact. Scripta Publishing Co, Washington, USA
- Smith A.; Kent R P.; Armstrong R L. (1967).** ASTM STP 567, p. 125, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- Statistisches Jahrbuch** für die Bundesrepublik Deutschland 2008.
ISBN: 978-3-8246-0803-4
- Summers D A. (1979).** Practical Applications of Erosion Processes. In: Treatise on Materials Science and Technology, Preece C M, ed., 16, 395-434
- Surma R.; Friedel L. (1985).** Geschwindigkeit der Tropfen in horizontalen Zweiphasen-Freistrahlen aus Wasser und Luft in ruhender Umgebung. Chemie Ingenieur Technik, 75 (7), 859-864

- Tambour Y. (1985).** A Lagrangian Sectional Approach for Simulating Droplet Size Distributions of Vaporizing Fuel Sprays in a Turbulent Jet. *Combustion Flame*, 60, 15-28
- Tanasawa Y.; Toyoda S. (1955).** On the atomisation of liquid jet issuing from a cylindrical nozzle. *The Technology Reports of the Tohoku University*, Vol. 21 (2), 135-136
- Thiruvengadam A. (1967).** The Concept of Erosion Strength, in *Erosion by Cavitation or Impingement*. ASTM STP408
- Troesch H A. (1954).** Die Zerstäubung von Flüssigkeiten. *Chem.-Ing.-Tech.*, Bd. 26 (6), 311-320
- Tropea C. (1999).** Laser-Doppler-Anemometrie. Grundlagen und Auslegungen. In: *Strömungsmesstechnik in der industriellen Forschung. Kurzlehrgang*, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany
- Tropea C. (2001).** DFG Annual Report, Schwerpunkt 1061: Fluidzerstäubung und Sprühvorgänge. www.sla.maschinenbau.tu.darmstadt.de/dfgspp/projekte.ger.html
- Truppel I.; Herold B.; Geyer M. (2001).** An automatic calibration algorithm for Tekscan pressure sensor, ATB Potsdam, Unpublished Work
- Tseng L K.; Ruff G A.; Faeth G M. (1992).** Effects of Gas Density on the Structure of Liquid Jets in Still Gases. *AIAA J*, 30 (6), 1537-1544
- UBA (42/1999).** Entwicklung von Parametern und Kriterien als Grundlage zur Bewertung ökologischer Leistungen und Lasten der Landwirtschaft - Indikatorensysteme. Umweltbundesamt, UBA-Texte 42/99.
- UBA (91/1999).** Umweltqualitäts- und Umwelthandlungsziele im Gewässerschutz – Sachstand und Ausblick. Umweltbundesamt, UBA-Texte 91/99.
- UBA (2000).** Ökobilanz für Getränkeverpackungen II des UBA – Materialband. Umweltbundesamt, UBA Texte 38/00.
- VDI (1997).** Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, Düsseldorf.
- von Willert D J.; Matyssek R.; Herppich W. (1995).** Experimentelle Pflanzenökologie. Thieme, Stuttgart, New York, ISBN 3-13-134401-6
- Walzel. P. (1980).** Zerteilgrenze beim Tropfenaufprall. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 52 (4), 338-339
- Walzel. P. (1982).** Auslegung von Einstoff-Druckdüsen. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 54 (4), 317-328
- Weber C. (1931).** Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Bd. 11 (2), 136-154
- Werner M. (1991).** Höchstdruckwasserstrahlen in der Bauindustrie: Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen. Lehrgang 13809/83.130, Technische Akademie Esslingen
- Wiedemeier J. (1981).** Flüssigkeitsfreistrahlen hoher Relativgeschwindigkeit und Bruchkinetik spröder Werkstoffe. Dissertation, Universität Hannover

- Wu P K.; Tseng L K.; Farth G M. (1992).** Primary Breakup in Gas/Liquid Mining Layers for Turbulent Liquids. *Atomization*, 2, 295-317
- Wu S S.; Kim T J. (1995).** An application study of plain water jet process for coating removal. *Proceedings of the 8th International Conference on Jet Cutting Technology*, 2, 779-792, Houston, USA
- Xu J.; Summers D A. (1980).** Experimental Evaluation of the Performance of Fan Jet Systems. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Jet Cutting Technology*, Rouen France, pp 37-46
- Yanaida K.; Osashi A. (1978).** Flow characteristics of water jets in air. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Jet Cutting Technology*, Paper A3, 39-54, Cranfield, England
- Yanaida K.; Osashi A. (1980).** Flow characteristics of water jets in air. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Jet Cutting Technology*, Paper A3, 33-44, Hannover, Germany
- Yarin A L.; Weiss D A. (1995).** Impact on drops on solid surfaces: Self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity. *Journal of Fluid Mechanics*, 283, 141
- Zaske J. (1973).** Tropfengrößenanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Zerstäubung im chemischen Pflanzenschutz. Dissertation, TU Berlin
- Zou C S.; Dang L.; Duan X.; Cheng D Z. (1985).** Investigation on Anatomy of Continuous Waterjet for Updating Jet Performance. *Proceedings of the 3rd American Water Conference*, 160-178, Pittsburgh, USA

8. Anhang

Anhang A

Beschreibung der Herstellung von Sand-Bindemittelgemisch-Platten zur Bestimmung des Abtrags- sowie Reinigungspotentials von Wasserstrahlen



Bestandteile:

1379 g	Aquariensand (Korngröße: 0,4 ... 1,4 mm)
138 g	Fugenspachtel VARIO (Rigips)
92 g	Speisestärke (Maisstärke)
170 ml	Wasser

Nach gründlichem Durchmischen der Bestandteile wird das Sand-Bindemittelgemisch in zwei standardisierte Metallrahmen von

30 x 10 x 20 cm bzw.

30 x 25 x 20 cm

gefüllt, geformt, glatt gestrichen und abgezogen, mit einer Stahlplatte belastet und vor dem Einsatz gepresst.



Pressdruck	2 bar
Pressdauer	10 min
Abbindezeit	2 Std.

Nach Abbindezeit von 2h sind die Sand-Bindemittelgemisch-Platten einsatzfähig.

Für jeden Abtragsversuch werden neue Platten hergestellt.

Bild A1. (oben) Zusammensetzung der Testkörper (Sand-Bindemittelgemisch-Platte) und (unten) Vorrichtung zur Pressen des Gemisches

Anhang B

Mittelwerte der Kenndaten zur Strahlstruktur, -wirkung und daraus abgeleitete Vergleichsgrößen (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**) unter Variation der Spritzdüsen- und Betriebsparameter gemäß **Tabelle 4.1** und **Tabelle 4.2**

Tabelle B1. Flachstrahldüsen, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$

B2. Flachstrahldüse, $\theta_{s,h=0} = 60^\circ$

B3. Vollkegeldüsen, $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$

Strahlvariante		$V_{s,sp}$	$C_{s,sp}$	$I_{s,sp}$	P_{max}	t_a	ξ_a	t_{ae}	ξ_{ae}	$E_{s,ae}$
		mm ³ mm ⁻² s ⁻¹	mg mm ⁻² s ⁻¹	g m s ⁻¹	kPa	mm	—	mm	—	mm ³ Nm ⁻¹
B1	E1_13	3,5	1,8	0,02	10,0	0,9	0,84	2,4	0,12	0,94
	E1_15	8,5	3,4	0,06	13,3	1,1	1,49	2,4	0,29	0,55
	E1_18	9,7	3,5	0,07	18,4	1,4	1,24	3,0	0,39	0,49
	E2_15	17,9	9,1	0,15	21,6	1,0	1,32	2,2	0,39	0,26
	E3_15	31,6	25,8	0,57	20,9	1,9	1,43	2,9	0,69	0,41
	E4_13	37,9	32,4	0,48	24,4	1,8	1,86	3,1	0,91	0,79
	E4_15	48,2	40,2	0,76	32,0	3,9	1,65	5,6	1,15	0,86
	E4_18	56,4	46,1	0,86	51,6	4,1	1,57	6,7	1,03	0,48
	E1_23	0,8	0,4	0,01	8,9	0,8	0,07	—	—	—
	E1_25	1,6	0,6	0,01	12,6	0,8	0,07	—	—	—
	E1_28	1,9	0,7	0,02	4,7	0,8	0,28	2,3	0,01	0,06
	E2_25	5,4	4,3	0,08	15,0	0,9	0,44	2,1	0,04	0,09
	E3_25	8,9	7,1	0,14	19,9	1,0	0,46	2,4	0,04	0,07
	E4_23	12,2	10,0	0,16	27,7	1,5	0,65	2,6	0,27	0,62
	E4_25	16,5	13,2	0,28	30,4	2,9	0,58	2,8	0,25	0,28
	E4_28	18,8	13,3	0,31	34,3	3,3	0,59	4,1	0,39	0,35
B2	E5_13				27,4	2,6		3,9		
	E5_15	59,7	58,2	1,12	42,3	4,1	2,17	5,8	1,44	0,62
	E5_25	50,6	49,7	0,98	42,0	2,0	1,98	3,4	0,96	0,42
B3	E6_15	10,0	7,8	0,14	17,1	1,3	—	—	—	—
	E7_15	4,8	3,9	0,06	15,0	1,1	—	—	—	—
	E6_25	3,0	2,3	0,04	11,6	—	—	—	—	—
	E7_25	1,5	1,1	0,02	9,8	0,7	—	—	—	—

Anhang B

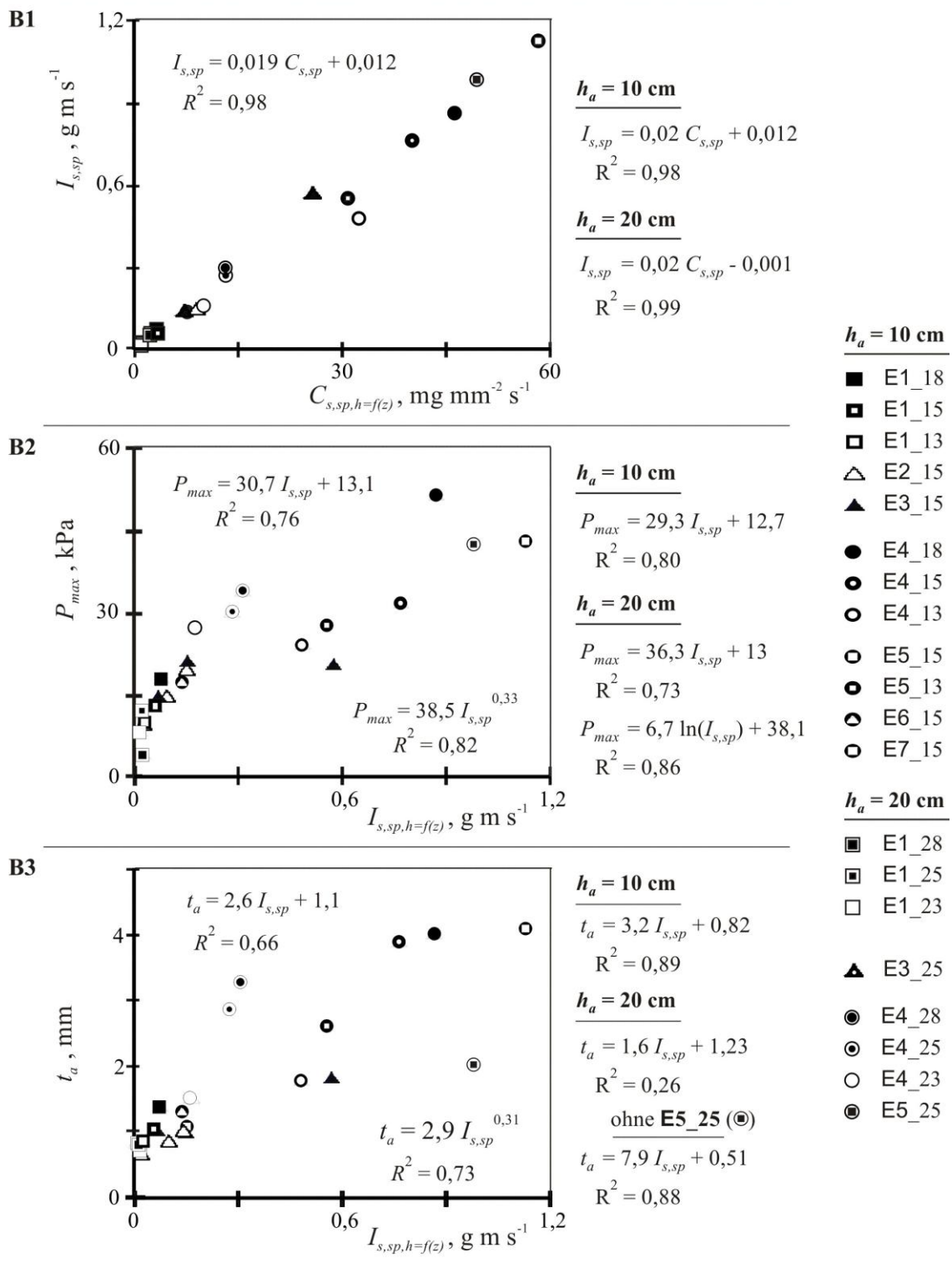


Bild B1 Mittelwerte der $I_{s,sp,h=f(z)}$ über $C_{s,sp}$ der abtragswirksamen Tropfenstrahlen
B2 Auf dem Foliensensor registrierte Werte der P_{max} in Abhängigkeit von mittleren $I_{s,sp,h=f(z)}$ (vgl. Abschnitt 4.2.2.1.3) und
B3 Mittelwerte der auf den Modellkörpern erfassten t_a unter Variation von mittleren $I_{s,sp,h=f(z)}$ (vgl. Abschnitt 4.2.2.1.4)

Anhang C

Mittelwerte teilflächenbezogener (vgl. **Bild 4.10**) Kenndaten zur Strahlstruktur, -wirkung und daraus abgeleitete Vergleichsgrößen (vgl. **Abschnitt 4.2.2.1.4**) unter Variation der Düsen- und Betriebsparameter gemäß **Tabelle 4.1** und **Tabelle 4.2**

Tabelle C1 Strahlvarianten in 10 cm h_a für Flachstrahldüsen ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$) verschiedener d_d

Teilflächen- bezogene Strahlvariante	$V_{s,sp}$ mm ³ mm ⁻² s ⁻¹	$C_{s,sp}$ mg mm ⁻² s ⁻¹	$I_{s,sp}$ g m s ⁻¹	P_{max} kPa	t_a mm	ξ_a —	t_{ae} mm	ξ_{ae} —	$E_{s,ve}$ mm ³ Nm ⁻¹
E1K13	4,6	2,9	0,032	21,0	2,3	1,00	3,3	0,57	4,46
E1K15	9,6	5,4	0,064	30,3	2,0	1,01	2,4	0,73	1,21
E1K18	11,0	5,3	0,071	43,7	3,2	1,00	3,2	0,96	1,18
E1M13	3,7	2,5	0,017	11,9	1,0	0,88	2,6	0,13	1,03
E1M15	9,2	4,9	0,037	19,0	1,1	1,45	2,7	0,26	0,50
E1M18	10,7	5,2	0,037	21,1	1,2	1,32	2,2	0,39	0,33
E1R13	3,0	2,7	0,002	4,8	0,6	0,75	2,1	0,01	0,05
E1R15	6,6	4,2	0,040	7,2	0,6	1,94	2,1	—	0,01
E1R18	7,9	4,1	0,016	7,5	0,7	1,30	2,1	—	—
E2K15	27,7	20,1	0,358	50,9	1,7	0,99	2,3	0,61	0,34
E2M15	17,9	13,9	0,210	30,3	0,9	1,22	2,1	0,13	0,10
E2R15	8,0	7,8	0,061	11,0	0,6	0,85	2,1	—	—
E3K15	42,1	22,8	0,829	51,4	3,2	0,96	3,3	0,94	0,49
E3M15	28,3	20,2	0,369	32,6	1,6	1,41	2,4	0,70	0,39
E3R15	26,5	20,4	0,164	11,1	1,2	2,41	2,3	0,19	0,11
E4K13	50,1	38,3	0,772	56,6	3,4	0,97	3,4	0,97	0,74
E4K15	72,9	59,8	1,708	83,6	8,9	0,97	8,9	0,97	0,79
E4K18	65,9	55,0	2,090	139,9	12,2	0,97	12,2	0,97	0,75
E4M13	37,5	31,3	0,512	36,8	1,2	1,89	2,5	1,19	0,88
E4M15	43,5	34,4	0,882	46,9	3,9	1,59	4,5	1,33	0,92
E4M18	65,8	52,2	1,490	82,7	3,9	1,79	4,4	1,54	0,43
E4R13	25,7	27,1	0,290	14,1	0,7	3,24	2,1	0,02	0,02
E4R15	29,4	22,1	0,322	16,2	1,3	2,83	2,4	0,93	0,52
E4R18	42,0	32,0	0,705	23,6	0,9	1,81	2,1	0,24	0,05

Anhang C

Tabelle C2 Strahlvarianten in 20 cm h_a für Flachstrahldüsen ($\theta_{s,h=0} = 90^\circ$)
verschiedener d_d

Teilflächen- bezogene Strahlvariante	$V_{s,sp}$ mm ³ mm ⁻² s ⁻¹	$C_{s,sp}$ mg mm ⁻² s ⁻¹	$I_{s,sp}$ g m s ⁻¹	P_{max} kPa	t_a mm	ξ_a —	t_{ae} mm	ξ_{ae} —	$E_{s,ae}$ mm ³ Nm ⁻¹
E1K23	1,7	0,8	0,013	1,4	0,6	0,59	—	—	—
E1K25	3,0	0,9	0,020	18,2	0,7	0,54	—	—	—
E1K28	6,2	1,7	0,041	0,2	1,2	1,00	2,3	0,21	0,59
E1M23	1,5	0,7	0,001	1,4	0,6	0,22	—	—	—
E1M25	2,7	0,9	0,014	14,0	0,6	0,19	—	—	—
E1M28	2,9	0,8	0,018	0,1	0,8	0,97	2,1	0,02	0,22
E1R23	0,9	0,4	—	—	0,6	0,02	—	—	—
E1R25	2,3	0,8	0,01	8,4	0,6	0,01	—	—	—
E1R28	2,7	0,7	0,011	—	0,6	0,15	2,1	—	0,22
E2K25	9,2	6,9	0,158	31,2	1,1	1,0	2,1	0,28	0,43
E2M25	8,7	6,7	0,149	24,3	0,9	1,99	2,1	0,07	0,10
E2R25	3,8	2,7	0,042	11,0	0,6	0,21	2,1	—	—
E3K25	14,9	12,1	0,372	40,0	1,3	0,99	2,4	0,3	0,33
E3M25	10,9	8,6	0,236	33,9	0,9	0,94	2,2	0,05	0,07
E3R25	7,5	4,4	0,090	15,7	0,6	0,16	2,1	—	—
E4K23	12,6	11,6	0,217	60,3	2,8	1,0	2,7	0,99	2,39
E4K25	35,3	29,9	0,869	64,6	3,0	1,0	3,1	0,96	0,55
E4K28	55,8	47,3	1,293	105,4	5,9	1,0	6,0	0,97	0,43
E4M23	12,6	11,2	0,191	52,0	1,6	1,11	2,6	0,59	1,36
E4M25	23,8	20,1	0,528	55,0	1,7	0,88	2,4	0,50	0,34
E4M28	26,8	22,6	0,766	77,6	3,0	1,10	3,5	0,97	0,52
E4R23	12,7	11,6	0,138	20,1	0,8	0,40	2,1	0,01	0,02
E4R25	11,3	9,5	0,153	24,0	1,1	0,31	2,3	0,10	0,06
E4R28	22,2	10,2	0,249	24,9	1,2	0,36	2,4	0,11	0,09

Anhang C

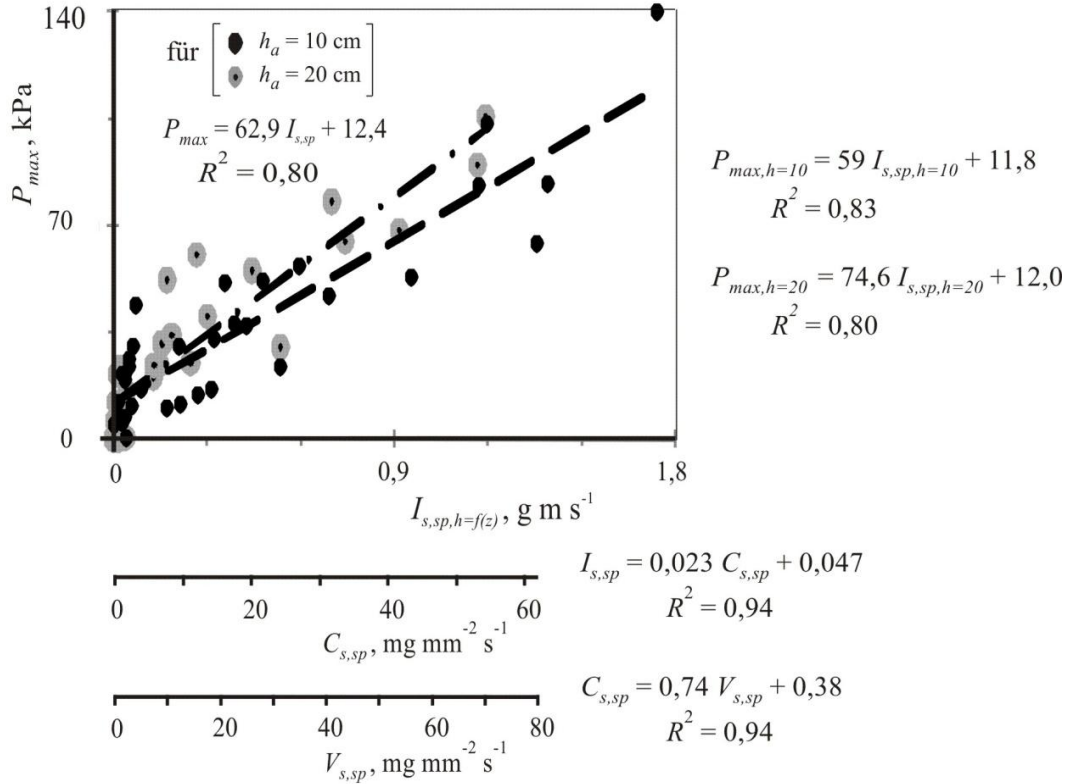
Tabelle C3 Strahlvarianten in 10 und 20 cm h_a für Flachstrahldüse E5, $\theta_{s,h=0} = 60^\circ$
und

C4 Strahlvarianten in 10 und 20 cm h_a für Vollkegeldüsen E6 und E7,
 $\theta_{s,h=0} = 90^\circ$, verschiedener d_d

	Teilflächen- bezogene Strahlvariante	$V_{s,sp}$ mm ³ mm ⁻² s ⁻¹	$C_{s,sp}$ mg mm ⁻² s ⁻¹	$I_{s,sp}$ g m s ⁻¹	P_{max} kPa	t_a mm	ξ_a —	t_{ae} mm	ξ_{ae} —	$E_{s,ve}$ mm ³ Nm ⁻¹
C3	E5K13				53,0	5,1		5,1		
	E5K15	69,0	67,1	1,215	102,8	8,8	1,05	8,8	1,05	0,85
	E5M13				37,6	2,3		3,0		
	E5M15	112,4	102,7	1,530	63,6	2,8	2,78	3,7	1,91	0,42
	E5R13				16,0	0,9		2,1		
	E5R15				20,0	0,7		2,1		
	E5K25	56,7	52,5	1,267	89,5	4,4	0,96	4,4	0,96	0,47
	E5M25	52,5	47,5	0,904	68,0	2,1	1,85	2,7	1,26	0,44
	E5R25	38,8	32,3	0,636	29,9	0,8	3,25	2,4	0,18	0,06
C4	E6K15	4,5	3,4	0,052	26,1	1,3	—	—	—	—
	E6R15	16,1	12,3	0,172	10,3	1,3	—	—	—	—
	E6K25	3,0	2,0	0,035	—	—	—	—	—	—
	E6M25	2,6	2,1	0,029	—	—	—	—	—	—
	E6R25	4,0	3,2	0,040	—	—	—	—	—	—
	E7K15	5,0	3,6	0,053	23,5	1,3	—	—	—	—
	E7M15	3,7	3,1	0,032	5,4	1,3	—	—	—	—
	E7R15	6,8	4,5	0,041	0.5	1,3	—	—	—	—
	E7K25	2,3	1,8	0,029	—	—	—	—	—	—
	E7M25	1,7	1,3	0,021	—	—	—	—	—	—
	E7R25	1,5	1,2	0,017	—	—	—	—	—	—

Anhang C

C1



C2

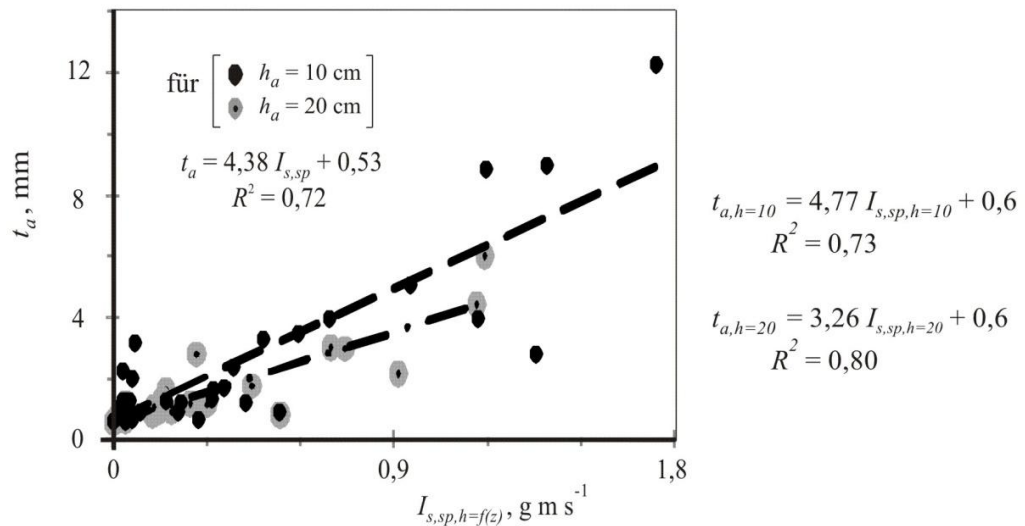


Bild C1 Auf dem Foliensensor registrierte Werte der P_{max} in Abhängigkeit der mittleren $I_{s,sp,h=f(z)}$ (vgl. Abschnitt 4.2.2.1.3) und
C2 Mittelwerte der auf den Sand-Bindemittelgemisch-Platten erfassten t_a unter Variation der mittleren $I_{s,sp,h=f(z)}$ (vgl. Abschnitt 4.2.2.1.4)

Anhang D

Mikrotopographische Messungen an Spargelstangen und Möhren

Aufsichtdarstellung der Messoberfläche zusätzlich zu Profilansichten mit Angabe der Profilkordinaten (x_A, y_A und x_E, y_E) und den registrierten Messdaten vor (—) und nach (---) der Druckbelastung mit verschiedenen Strahlvarianten

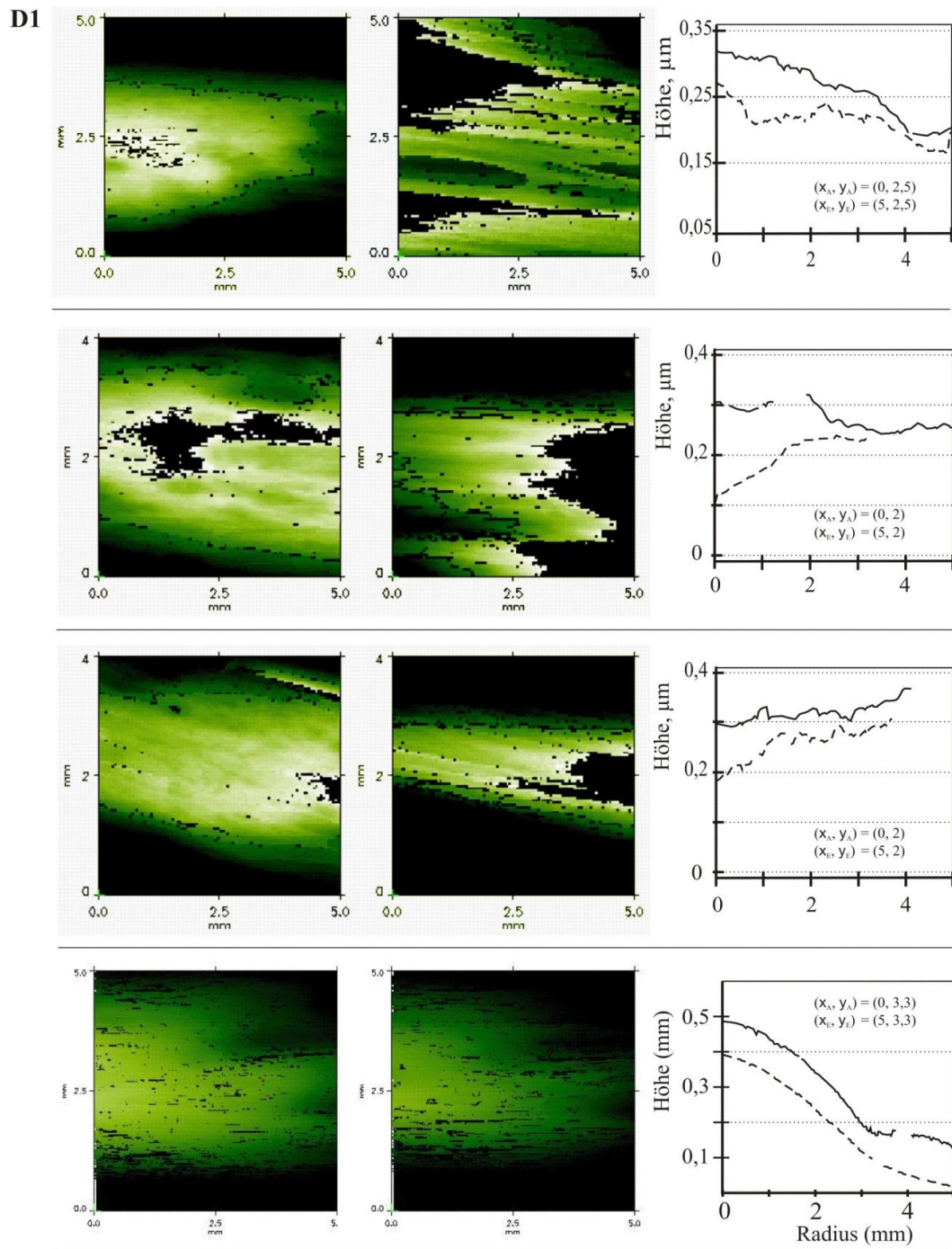


Bild D1 Spargelbeanspruchung durch Strahlvariante E3_13

Anhang D

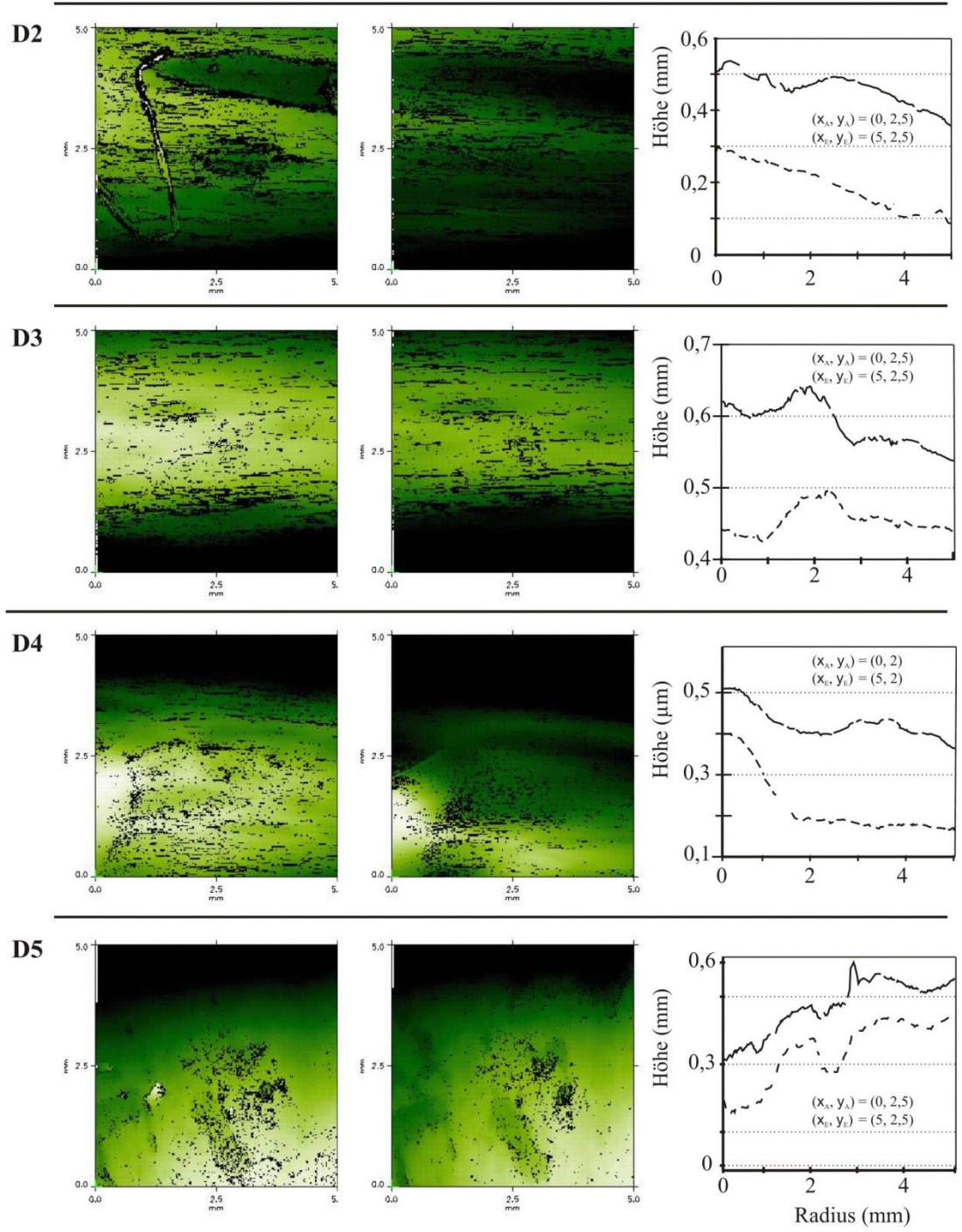


Bild D2 Spargelbeanspruchung durch Strahlvariante E4_13

D3 Spargelbeanspruchung durch Strahlvariante E3_15

D4 Spargelbeanspruchung durch Strahlvariante E4_15

D5 Möhrenbeanspruchung durch Strahlvariante E4_15

Anhang E

Abschätzung und Bewertung der Reinigungseffektivität der Wasserstrahlen bei Bleichspargel- und Möhrenwäsche durch Bonituren (siehe Abschnitt 4.3.1)
















Strahlvariante und Spritzbedingungen	frisch, ungereinigt	gereinigt, Anzahl des Waschdurchgangs	
		1mal	2mal
E2_23 Düse: E2 $p = 3 \text{ bar}$			
Düse: E3 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 15 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 14 -abstand: 20 cm			
			
			
			
Düse: E3 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 15 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 8 (nur obere Düsenreihe) -abstand: 20 cm			
			

Bild E1 *ungereinigte und mittels der in Bild 4.1 dargestellten Waschmaschine gereinigte Spargel sowie weitere Reinigung mit veränderten Prozessparametern*

Anhang E
















Strahlvariante und Spritzbedingungen	frisch, ungereinigt	gereinigt, Anzahl des Waschgangs	
		1mal	2mal
Düse: E3 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 15 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 14 -abstand: 10 - 12 cm			
			
Reinigungsversuche von vorgewaschenen Bleichspargeln	frisch, vorgewaschen	Anzahl des Waschdurchgangs	
		2mal	3mal
Düse: E3 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 15 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 14 -abstand: 10 - 12 cm			
			
			
			

Bild E2 ungereinigte und mittels der in **Bild 4.1** dargestellten Waschmaschine gereinigte Spargel sowie weitere Reinigung von vorgewaschenen Spargel mit veränderten Prozessparametern

Anhang E






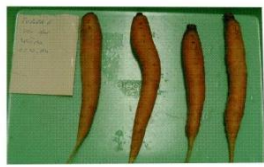
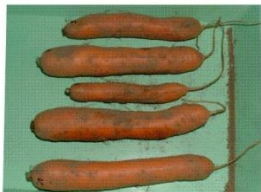





Strahlvarianten und Spritzbedingungen	frisch, ungereinigt	gereinigt
E3_23 Düse: E3 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 20 - 25 \text{ cm}$		
$h_a = 15 - 20 \text{ cm}$		
E4_23 Düse: E4 $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 20 - 25 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 40		
$h_a = 15 - 20 \text{ cm}$ Düsenanzahl: 25	  	  

Bild E2.1 frisch geerntete, ungereinigte und hydromechanisch beanspruchte Möhren durch Strahlvarianten mit E3 und E4 unter Variation der Betriebsparameter

Anhang E

<p>Strahlvarianten und Spritzbedingungen</p> <p>E4_23</p> <p>Düse: E4 $d_d = 1,7 \text{ mm}$ $p = 3 \text{ bar}$ $v_F = 13 \text{ cm s}^{-1}$ $t_V = 14 \text{ s}$ Düsenanzahl: 40</p> <p>Strahlstruktur E4_23 $I_{s,sp} = 0,16 \text{ g m s}^{-1}$</p> <p>E4K23 $I_{s,sp,[K]} = 0,6 \text{ g m s}^{-1}$</p>	<p>a.</p> <p>$h_a = 25 \text{ cm}$</p> <p>Wasch-durchgang</p> <p>ungereinigt</p> <p>1×</p> <p>3×</p> <p>6×</p> <p>9×</p>	<p>b.</p> <p>$h_a = 20 \text{ cm}$</p> <p>Wasch-durchgang</p> <p>ungereinigt</p> <p>1×</p> <p>3×</p> <p>5×</p>
<p>Strahlvariante E4_23</p> <p>Düse: E4 $d_d = 1,7 \text{ mm}$ $p = 3 \text{ bar}$ $h_a = 20 \text{ cm}$ $v_F = 13 \text{ cm s}^{-1}$ $t_V = 14 \text{ s}$ Düsenanzahl: 25</p> <p>Strahlstruktur E4_23 $I_{s,sp} = 0,16 \text{ g m s}^{-1}$</p> <p>E4K23 $I_{s,sp,[K]} = 0,6 \text{ g m s}^{-1}$</p>	<p>c.</p> <p>Wasch-durchgang</p> <p>ungereinigt</p> <p>1×</p> <p>2×</p> <p>3×</p>	<p>d.</p> <p>Wasch-durchgang</p> <p>ungereinigt</p> <p>1×</p> <p>2×</p> <p>3×</p>

Bild E2.2 ungereinigte und mit der Strahlvariante E4_23 in den verschiedenen Waschmaschinen (Bild 4.1 und Bild 4.4) gereinigte Möhren ohne und mit Veränderung bestimmter Betriebsparameter wie Arbeitsabstand h_a , Düsenanzahl und -abstand